

L'acoustique ultrasonore et ses applications

1^{re} partie

Jean-Pierre Lefebvre

Philippe Lasaygue

Laboratoire de mécanique et d'acoustique

UPR CNRS 7051

31, Chemin Joseph-Aiguier

13402 Marseille CEDEX 9

E-mail : lefebvre@lma.cnrs-mrs.fr, lasaygues@lma.cnrs-mrs.fr

Catherine Potel

Laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine

UMR CNRS 6613

Avenue Olivier Messiaen

72085, Le Mans CEDEX 9

E-mail : Catherine.Potel@univ-lemans.fr

Jean-François de Belleval

Philippe Gatignol

Laboratoire Roberval

Unité de recherche en mécanique

UMR CNRS 6066

Université de Technologie de Compiègne

BP 20 529

60205 Compiègne CEDEX

E-mail : Jean-Francois.de-Belleval@utc.fr, Philippe.Gatignol@utc.fr

Le but de cet article est de présenter les principes de base de la propagation des ultrasons dans les milieux solides (différents types d'ondes, interactions aux interfaces) et de préciser leurs modes de génération par différents types de transducteurs.

The aim of the paper is to present the fundamental principles of both the ultrasonic propagation in solid media (different kinds of waves, interactions with interfaces) and the generation of ultrasonic waves by means of different kinds of transducers.



stricto sensu, les ultrasons sont des **ondes acoustiques**, donc mécaniques, de fréquence supérieure à la fréquence de coupure de l'oreille humaine, soit environ 15 kHz. Au-delà du gigahertz, le terme utilisé est hypersons. De manière générale, la vitesse de propagation d'une onde est d'autant plus grande que le temps de transmission de l'information d'une particule élémentaire constituant la matière à sa voisine est rapide, suivant le niveau de cohésion de la matière. Ainsi, les vitesses de propagation d'une onde dans l'air, l'eau ou l'aluminium sont approximativement respectivement égales à 340 m/s, 1 500 m/s et 6 000 m/s. Selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire. Dans ce dernier cas, l'onde est alors une onde **élastique**. Les ondes ultrasonores se propagent moins bien dans les gaz que les sons audibles, d'autant plus mal que leur

fréquence est élevée. L'acoustique sous-marine quant à elle, continue d'être comptée au nombre des applications des ondes ultrasonores, alors que les fréquences des sonars à longue portée sont maintenant inférieures au kilohertz. Ceci est dû au fait que les expérimentations en modèle réduit des laboratoires de recherche sont effectivement menées aux fréquences ultrasonores, et qu'il s'agit là d'une application historique des ultrasons.

La discipline des ultrasons est en effet véritablement née au cours de la première guerre mondiale, avec l'idée de P. Langevin d'utiliser la **piézo-électricité** pour les produire et les recevoir, dans le but de détecter les sous-marins. C'était l'ancêtre du **Sonar** (SOund NAVigation Ranging), et donc la naissance de l'acoustique sous-marine. On peut dire que la piézo-électricité a été la chance des ultrasons, permettant de les produire et de les observer à une échelle industrielle sur une vaste plage de puissances

(émissions pouvant être inférieures au dixième de milliwatt par centimètre carré en diagnostic médical, souvent supérieures au kilowatt par centimètre carré pour les applications énergétiques industrielles), et de fréquences (depuis le kilohertz en acoustique sous-marine, jusqu'au gigahertz en microscopie acoustique). Réciproquement, les ultrasons ont été la chance de la piézo-électricité, puisque celle-ci, découverte en 1880 par les frères Curie, ne devait rester jusque-là qu'une curiosité de laboratoire. Mais sans doute est-ce la guerre elle-même qui a été la «chance» de ces deux disciplines, puisque c'est au cours de la seconde guerre mondiale que devaient apparaître les premiers matériaux piézo-électriques susceptibles d'être véritablement produits à une échelle industrielle, les céramiques piézo-électriques, matériaux de synthèse encore utilisés aujourd'hui.

Ce sont cependant des préoccupations purement **civiles**, puisque d'ordre **médical**, qui devaient conduire au produit très achevé qu'est aujourd'hui l'**échographie ultrasonore**, prolongement naturel du sonar, et première technique véritablement opérationnelle d'imagerie ultrasonore, après les déboires de l'holographie acoustique. L'échographie, deuxième stade de l'évolution des ultrasons après le sonar, occupe actuellement une place de choix dans le domaine médical, mais également dans le domaine du contrôle et de l'évaluation non destructifs des matériaux.

En parallèle, une troisième évolution pointe actuellement, celle de l'**imagerie numérique** dont l'objectif à terme est l'imagerie quantitative. La voie a été ouverte, à nouveau dans le domaine médical, par le «scanner» X. Cette évolution est due aux progrès ultra-rapides qu'effectue aujourd'hui la micro-informatique en offrant au mono-utilisateur des moyens de calcul de plus en plus puissants. Ces moyens sont déjà supérieurs à ceux du matériel qui était implanté dans les «scanner» X de la première génération. Ils seront bientôt comparables à ceux qu'offrent actuellement les super-ordinateurs utilisés pour le dépouillement des campagnes de **sismique réflexion**, cette dernière n'étant rien d'autre qu'une échographie du sous-sol.

Le **sondage acoustique** est ainsi devenu une discipline à part entière, il est concerné principalement par trois grands domaines d'application :

- les applications **géophysiques** : sondage de la terre (sismique réflexion et réfraction), de la mer (Sonar, Sonar Doppler, acoustique sous-marine en général), de l'atmosphère (Sodar, Sodar Doppler),
- le diagnostic **médical** (échographie, débitmétrie Doppler),
- le contrôle et l'évaluation non destructifs des matériaux et des écoulements (débitmétrie) **industriels**.

Dans cette discipline, tous les problèmes se posent à peu près dans les **mêmes termes scientifiques** (c'est-à-dire tant physiques, que mathématiques et numériques) : excitation d'une onde mécanique contrôlée dans un milieu, interaction de cette onde avec le milieu, mesures de diffraction ou de propagation, inversion des données pour obtenir les paramètres caractéristiques (du point de vue acoustique) du milieu. Le traitement du signal

occupe une place centrale dans cette stratégie. Les différences ne tiennent finalement qu'à la technologie de la transduction. En effet, pour avoir une sensibilité optimale aux paramètres recherchés, il faut que la longueur d'onde utilisée soit du même ordre de grandeur que les échelles caractéristiques du milieu. Ceci nécessite un choix adapté, d'une part de la fréquence de travail, d'autre part de la période d'échantillonnage spatial des mesures (qui doit être du même ordre de grandeur, et si possible inférieure à la longueur d'onde). Les fréquences adoptées iront ainsi de quelques Hertz à quelques dizaines de Hertz en sondage sismique (longueurs d'onde décamétriques, voire kilométriques), à quelques centaines de mégahertz voire le gigahertz pour la microscopie acoustique (longueurs d'onde micrométriques), en passant par exemple par le ou les mégahertz pour l'échographie (longueurs d'onde de quelques dixièmes de millimètre). Le résultat est qu'une «barrette» (antenne linéique) d'échographie diffère quand même notablement, ne serait-ce que par la taille, d'une chaîne de camions de vibro-sismique.

Par ailleurs, les ultrasons ne sont pas utilisés uniquement pour véhiculer un **signal-sonde**, mais également pour véhiculer une **énergie**, qui est leur énergie mécanique. C'est ce que l'on appelle les applications énergétiques des ultrasons, de bien moins grande portée (tant scientifique que pratique), et suscitant bien moins de recherches que leurs applications au sondage.

Une autre application qui ne fera pas l'objet de développements dans cet article, compte tenu de sa spécificité, concerne l'utilisation des ondes acoustiques de surface (SAW : Surface Acoustic Waves) en électronique. Des éléments utilisés comme des boîtes noires par les électroniciens, font des traitements du signal sophistiqué (filtrage, convolution, oscillateur...) en faisant appel à la propagation d'ondes de surface (SAW) sur des substrats piézo-électriques.

Avant d'aborder la présentation des différentes applications, rappelons quelques principes de base sur la propagation des ondes acoustiques ou élastiques dans les fluides et les solides.

Ondes élastiques dans les fluides et les solides

Les différents types d'ondes de volume

Ainsi qu'il a été vu dans l'introduction, selon la nature du milieu (fluide ou solide), une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire.

Milieu fluide

En milieu fluide, seules peuvent se propager des ondes de compression-dilatation : l'onde se propage en comprimant puis en détendant de proche en proche des tranches de fluide (voir Fig. 1-a). La direction de déplacement des particules est appelée polarisation, et lorsque l'on peut mettre en évidence, au moins localement, une direction de propagation, ces ondes prennent le nom d'ondes longitudinales. Leur polarisation est en effet parallèle à la direction de propagation.

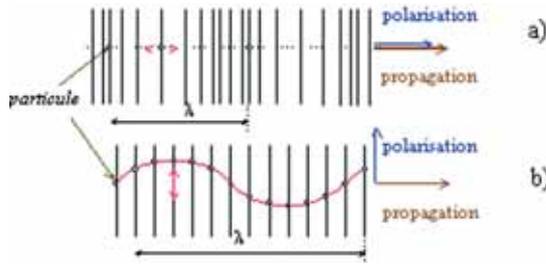


Fig. 1 : a) Ondes de compression
b) Ondes de cisaillement

Solide isotrope

Un solide est isotrope s'il a les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. Dans un tel milieu, deux types d'onde peuvent se propager : des ondes de compression et des ondes de cisaillement. Les premières sont identiques à celles décrites précédemment en milieu fluide. Les secondes, liées à des contraintes de cisaillement, se propagent sans variation de volume. Lorsque l'on peut mettre en évidence une direction de propagation, le mouvement particulaire (polarisation) est perpendiculaire à la direction de propagation, et les ondes prennent alors le nom d'ondes transversales (voir Fig. 1-b). Dans un certain nombre de matériaux courants, leur vitesse de propagation est deux fois plus faible environ que la vitesse de propagation des ondes longitudinales

Solide anisotrope

Contrairement au solide isotrope, un solide anisotrope n'a pas les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. À titre d'exemple, un pli composite en carbone/époxyde, dont les fibres sont toutes dans la même direction, aura une résistance à la traction beaucoup plus grande dans le sens des fibres, que perpendiculairement à ces dernières. À l'échelle macroscopique, un tel pli pourra être modélisé par un matériau cristallin de symétrie hexagonale, encore appelé matériau transversalement isotrope, le plan d'isotropie étant le plan perpendiculaire à la direction des fibres. De manière générale, pour une direction de propagation donnée, il y a propagation de trois types d'onde (au lieu de deux en milieu isotrope) dont la polarisation n'est plus ni parallèle, ni perpendiculaire à la direction de propagation [1]. L'onde dont la direction de polarisation est la plus proche de la direction de propagation prend le nom d'onde quasi longitudinale et les deux autres, d'ondes quasi transversales. L'onde quasi longitudinale est généralement celle dont la vitesse de propagation est la plus grande.

Ondes modales

En fonction de la nature des défauts recherchés, il peut s'avérer intéressant d'utiliser des ondes que l'on peut regrouper sous le vocable général d'ondes modales et qui comprennent les ondes guidées, les ondes de surface et les ondes d'interface. Ce sont des modes de propagation pour lesquels l'énergie acoustique se propage le long de la ou des interfaces tandis qu'elle reste bornée dans une direction perpendiculaire à ces interfaces. Lorsqu'une petite partie de l'énergie de l'onde

modale se propage dans le milieu entourant la structure étudiée (cas d'une pièce plongée dans l'eau) et que le rapport des impédances acoustiques est assez faible pour laisser l'onde se propager dans le milieu extérieur pour un nombre significatif de longueurs d'onde, l'onde modale prend le nom d'**onde modale généralisée**.

Ondes de Lamb

Des ondes guidées très utilisées en contrôle non destructif sont les **ondes de Lamb** qui se propagent dans la totalité de l'épaisseur de la pièce, d'où le terme également employé d'ondes de plaque [2]. Les modes de Lamb purs se propagent dans une plaque isotrope environnée de vide. Ce sont des combinaisons d'ondes longitudinales et transversales [1]. Lorsque cette plaque est plongée dans un fluide, ces ondes sont appelées «ondes de Lamb généralisées». Le terme anglais est «leaky Lamb waves» pour bien signifier que l'énergie «fuit» dans le fluide (to leak = fuir). En milieu isotrope, deux types de modes sont obtenus [1] : les modes de Lamb symétriques pour lesquels la première et la dernière interface du matériau vibrent symétriquement par rapport au plan médian (voir Fig. 2-a), et les modes de Lamb antisymétriques pour lesquels ces interfaces vibrent parallèlement (voir Fig. 2-b). Les ondes de Lamb n'existent que pour certains couples (vitesse, fréquence) qui sont déterminés par les relations de dispersion de ces ondes.

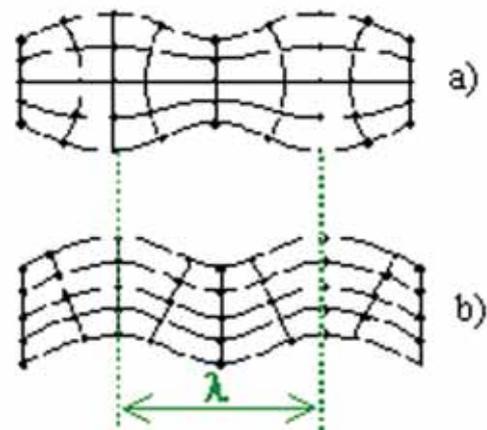


Fig. 2 : Modes de Lamb symétriques (a) et antisymétriques(b)

Ondes de Rayleigh

Les ondes de surface affectent seulement le voisinage de la surface du matériau étudié. Parmi ces ondes, on trouve les **ondes de Rayleigh**, découvertes par Lord Rayleigh en 1885, se propageant à la surface d'un milieu isotrope semi-infini dont l'interface est libre (vide du côté opposé). Le passage de l'onde provoque un mouvement elliptique des particules et une ondulation de la surface sur une petite épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde [1]. L'amplitude du mouvement diminue à mesure que l'on s'éloigne de l'interface. Lorsqu'un fluide prend la place du vide, ces ondes prennent le nom d'«ondes de Rayleigh généralisées» ou «leaky Rayleigh waves» en anglais. Ces ondes peuvent être utilisées en contrôle non destructif pour détecter des fissures au voisinage d'une interface.

Contrairement aux ondes de Lamb, l'onde de Rayleigh est non dispersive en milieu homogène (elle se propage pour un angle d'incidence donné quelle que soit la fréquence).

Interaction d'une onde plane avec une interface plane

Dans le cas où deux milieux semi-infinis sont séparés par une interface plane, la nature des ondes réfléchies et transmises à l'interface dépend de la nature de l'onde incidente (longitudinale, transversale, quasi longitudinale QL, quasi-transversale QT) et de la nature des milieux (fluide, solide isotrope ou anisotrope). On appelle plan sagittal (ou plan d'incidence), le plan perpendiculaire à l'interface qui contient la direction de propagation.

Cas des milieux fluides et solides isotropes

l'interface, c'est-à-dire parallèlement au plan sagittal. C'est l'onde incidente qui, en imposant un déplacement dans le plan sagittal, impose la nature des ondes réfléchies et transmises. Ainsi, une onde incidente L, donc polarisée dans le plan sagittal, et faisant vibrer les particules uniquement dans ce plan, par raison de symétrie, ne pourra générer que des ondes faisant vibrer les particules dans le même plan, c'est-à-dire des ondes L et TV (voir Fig. 3-a). De même, une onde incidente TV ne pourra générer que des ondes TV et L. Si grâce à l'interaction avec l'interface, une onde de nature différente (TV par exemple) de celle de l'onde incidente (L par exemple) est générée, on dit qu'il y a **conversion de mode**. Cette conversion peut se produire aussi bien par réflexion (onde dans le milieu d'incidence) que par transmission (onde dans

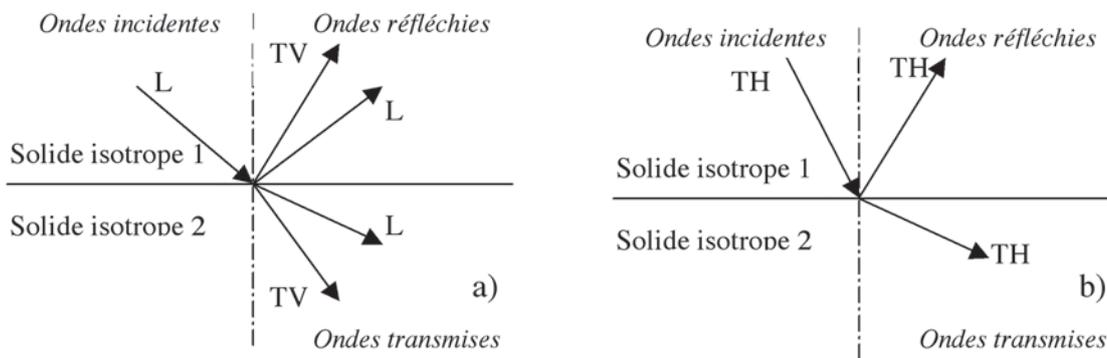


Fig. 3 : Interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux isotropes.
(a) onde incidente L ou TV
(b) onde incidente TH

Le plan de l'interface sert de référence pour repérer la polarisation des ondes transversales : une onde transversale de polarisation contenue dans le plan de l'interface, c'est-à-dire telle que les particules vibrent parallèlement à ce plan au passage de l'onde, est appelée **onde transversale horizontale** (TH). Une onde transversale de polarisation contenue dans le plan perpendiculaire au plan de l'interface, c'est-à-dire que les particules vibrent parallèlement à ce plan au passage de l'onde, est appelée **onde transversale verticale** (TV). Notons que cette dernière onde est donc polarisée dans le plan sagittal. L'onde longitudinale (L), quant à elle, est toujours polarisée dans le plan perpendiculaire au plan de

le deuxième milieu). Un raisonnement analogue démontre qu'une onde incidente TH, polarisée perpendiculairement au plan sagittal, ne pourra générer que des ondes faisant vibrer les particules perpendiculairement au plan sagittal, c'est-à-dire des ondes TH (voir Fig. 3-b).

Cas des milieux anisotropes

Les ondes n'étant plus purement longitudinales ou transversales, l'interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux anisotropes génère trois ondes dans chaque milieu (voir Fig. 4-a). Dans le cas pratique d'un contrôle dans l'eau, l'onde incidente est toujours longitudinale et génère trois ondes dans la

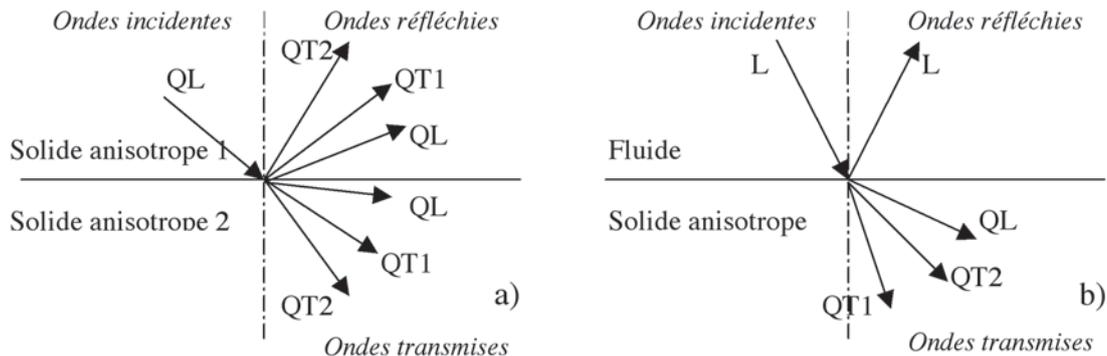


Fig. 4 : Interaction d'une onde incidente avec une interface séparant deux milieux dont l'un au moins est anisotrope.
(a) milieu incident anisotrope
(b) milieu incident fluide

pièce à contrôler : une onde quasi longitudinale (QL) et deux ondes quasi-transversales (QT1 et QT2) (voir Fig. 4-b). Dans certaines configurations, il peut arriver que l'une ou plusieurs des trois ondes ait un coefficient de transmission nul.

Surfaces des lenteurs

Une façon commode de représenter l'anisotropie d'un milieu est d'utiliser les **surfaces des lenteurs** [1]. On appelle **vecteur lenteur**, le vecteur porté par la direction de propagation de l'onde et de module égal à l'inverse de sa vitesse de phase dans cette direction. Les surfaces des lenteurs sont le lieu de l'extrémité de ce vecteur pour toutes les directions de propagation des ondes. Dans un milieu fluide ou isotrope, la vitesse d'une onde étant la même quelle que soit la direction, les surfaces des lenteurs sont des sphères (une pour les ondes longitudinales et une plus grande pour les ondes transversales). Dans un milieu anisotrope, la vitesse d'une onde dépendant de la direction, ces surfaces sont plus complexes. Une coupe dans un plan des surfaces des lenteurs pour un matériau de type carbone époxyde est donné figure 5.

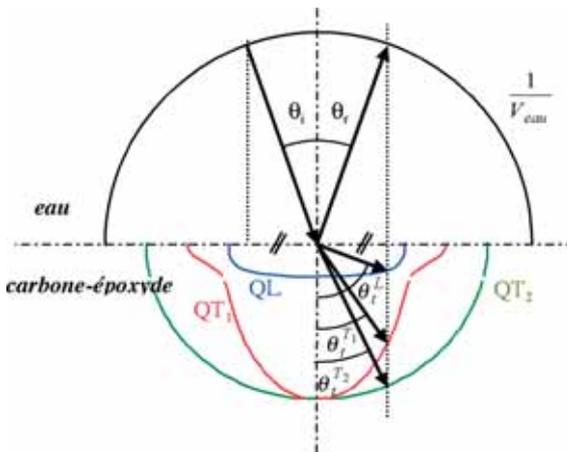


Fig. 5 : Lois de Snell-Descartes : interface eau-carbone/époxyde

Lois de Snell-Descartes

La conservation de la projection sur l'interface des vecteurs lenteur de toutes les ondes (incidente, réfléchi(e)s et transmise(s)) permet d'obtenir les lois de Snell-Descartes :

$$\frac{\sin \theta_i}{V_i} = \frac{\sin \theta_r}{V_r} = \frac{\sin \theta_t}{V_t} \quad (1)$$

où θ_i , θ_r et θ_t sont les angles respectivement d'incidence, de réflexion et de transmission, pris par rapport à la normale à l'interface. V_i , V_r et V_t sont les vitesses des ondes respectivement incidente, réfléchi(e)s et transmise(s).

Dans le cas général des milieux anisotropes, ces vitesses dépendent de la direction de propagation donc respectivement des angles θ_i , θ_r et θ_t . Les lois de Snell-Descartes ne permettent donc pas le calcul explicite des angles de réflexion et de réfraction. La figure 5 présente le cas d'une interface eau/carbone époxyde. L'onde incidente est purement longitudinale. Une seule onde est réfléchi(e) dans l'eau, et trois ondes sont transmises dans le solide. Les surfaces des lenteurs permettent une construction géométrique simple de la direction des ondes réfléchies et transmises.

En effet, en utilisant l'intersection avec le plan sagittal des surfaces des lenteurs de l'eau et du carbone époxyde (dont seulement la moitié est représentée), il suffit de tracer une droite verticale correspondant à l'angle d'incidence pour obtenir, sur l'horizontale, la quantité $\sin \theta_i / V_i$ avec $V_i = V_{\text{eau}}$. Le report de cette quantité à droite permet d'obtenir une intersection avec la courbe des lenteurs de l'eau, et trois avec les courbes des lenteurs du carbone époxyde, et par suite, les angles de réflexion et de transmission.

Notion d'angle critique

En utilisant la construction de la Figure 5, il apparaît qu'à partir d'un certain angle d'incidence, il n'y a plus d'intersection avec l'une ou l'autre des courbes des lenteurs. Les ondes correspondantes ne sont alors plus propagatives et deviennent **inhomogènes** : elles voient leur énergie se propager parallèlement à l'interface tandis que l'amplitude de déplacement diminue de manière exponentielle au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'interface. Les figures 6 montrent que les ondes QL, QT1 et QT2 deviennent inhomogènes à partir des angles respectifs θ_{c1} , θ_{c2} , θ_{c3} , appelés respectivement premier, deuxième et troisième **angles critiques** pour l'interface eau/carbone époxyde.

Il est à noter que la notion d'angle critique fait toujours intervenir une interface entre deux matériaux, et que parler du premier angle critique dans l'acier par exemple peut prêter à confusion : le premier angle critique pour une interface eau/acier n'a aucune raison d'être égal au premier angle critique pour une interface plexiglas/acier.

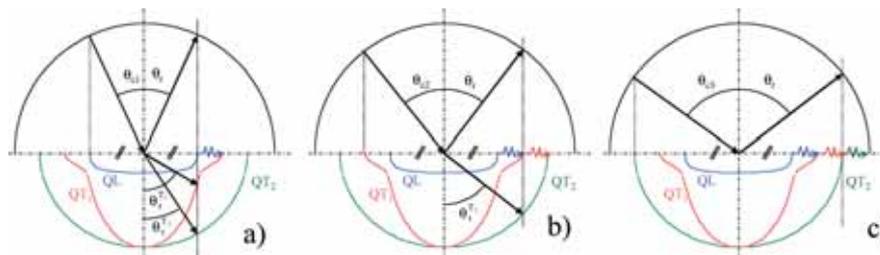


Fig. 6 : Angles critiques pour une interface eau-carbone/époxyde.
(a) 1^{er} angle critique ; l'onde QL devient inhomogène
(b) 2^{ème} angle critique : l'onde QT1 devient elle aussi inhomogène
(c) 3^{ème} angle critique : toutes les ondes transmises sont inhomogènes.

Les transducteurs ultrasonores

Les applications des ultrasons étant très diverses, il n'est pas possible de décrire tous les procédés de génération et de détection pour chacune d'elles. On décrira donc essentiellement les transducteurs destinés au contrôle industriel, ceux utilisés en contrôle médical étant généralement très similaires.

De nombreux procédés permettent actuellement de générer et/ou de détecter des ondes ultrasonores, que ce soit au moyen de lasers (pour la génération par thermoélasticité et pour la détection par interférométrie), ou par effet électromagnétique (effet inductif) ou électrostatique (effet capacitif), ou encore par magnétostriction, mais le procédé le plus largement utilisé fait appel à l'effet piézo-électrique. Ces transducteurs ont l'avantage d'être utilisables aussi bien à l'émission qu'à la réception (phénomène réciproque), leur composant principal est un élément piézo-électrique (lame mince pour les transducteurs dans la gamme du mégahertz et au-dessus) ; à l'émission l'élément piézo-électrique est mis en vibration par un signal électrique ; à la réception la vibration ultrasonore crée un champ électrique détecté sur des électrodes situées de part et d'autre de la lame.

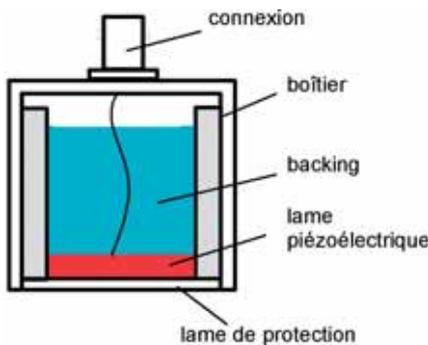


Fig. 7 : Éléments constitutifs

La figure 7 représente un schéma d'un tel transducteur et de ses éléments constitutifs. Les ultrasons se propagent mal dans l'air et, pour ce type de transducteurs, les ultrasons étant générés à l'intérieur du transducteur, il est en général nécessaire d'utiliser un milieu de couplage entre le transducteur et l'élément que l'on veut sonder. En contrôle industriel, soit on immergera la pièce dans un fluide (généralement de l'eau), soit on procédera «par contact» en interposant un «couplant» (huile, graisse...) entre la pièce et le transducteur. En contrôle médical, on pourra opérer en immersion mais plus souvent par contact à l'aide d'un gel.

Différents types de transducteurs

Selon le matériau, la géométrie de l'élément sondé, les défauts recherchés et la configuration expérimentale requise, différents types de transducteurs sont utilisés. La liste qui suit n'est pas exhaustive.

- Les transducteurs droits ou plans fonctionnent suivant le principe décrit précédemment. L'onde se propage perpendiculairement à la face avant du transducteur.

- Les transducteurs focalisés sont utilisés afin d'augmenter la finesse de résolution du contrôle, et concentrent le faisceau ultrasonore autour d'un point. La focalisation est obtenue soit au moyen d'une lame piézo-électrique incurvée, soit par focalisation électronique ou encore grâce à une lentille acoustique.

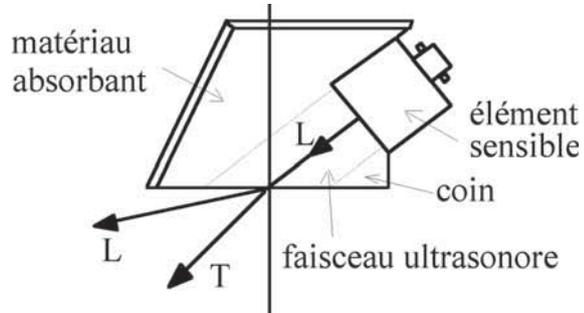


Fig. 8 : Transducteur d'angle

- Les transducteurs d'angle permettent un contrôle sous incidence oblique (voir Fig. 8). Comme il a été vu au § «Cas des milieux fluides et solides isotropes», l'interaction d'une onde incidente longitudinale avec une interface séparant deux milieux solides génère, dans le cas isotrope et suivant l'angle d'incidence, soit deux ondes propagatives (une onde longitudinale et une onde transversale) soit une seule onde propagative (onde transversale) dans le milieu de transmission. C'est ce que l'on appelle la **conversion de mode**. Lorsque ces transducteurs sont à angle fixe, ils sont adaptés à un matériau donné.

La dénomination courante de «transducteur en OT à 45°» ne signifie donc pas que ce transducteur génère des ondes transversales faisant un angle de 45° avec la normale à l'interface dans tous les cas, mais seulement pour un matériau particulier.

- Les transducteurs doubles séparent la fonction d'émission de la fonction de réception et comportent donc deux éléments sensibles.

- Les transducteurs à ondes transversales nécessitent l'utilisation d'un couplant visqueux. En effet, l'eau, tout comme la graisse, ne permet pas la propagation d'ondes autres que longitudinales. De manière générale, il est préférable de générer des ondes transversales par conversion de mode.

- Les transducteurs à couplage par air permettent de s'affranchir de la nécessité d'un couplant entre le transducteur et la pièce à contrôler. Toute la difficulté réside dans la très grande différence d'impédance acoustique entre l'air et les matériaux couramment utilisés. Dans ce type de configuration, l'amplitude reçue par le transducteur récepteur est réduite d'un facteur très important par rapport à un couplant classique.

- Les barrettes linéaires de transducteurs sont constituées de multiples transducteurs élémentaires alignés, ce sont de véritables antennes qui permettent de focaliser le faisceau et/ou de faire des balayages électroniques très rapides (linéaires ou sectoriels).

Faisceau acoustique ultrasonore émis par un transducteur plan

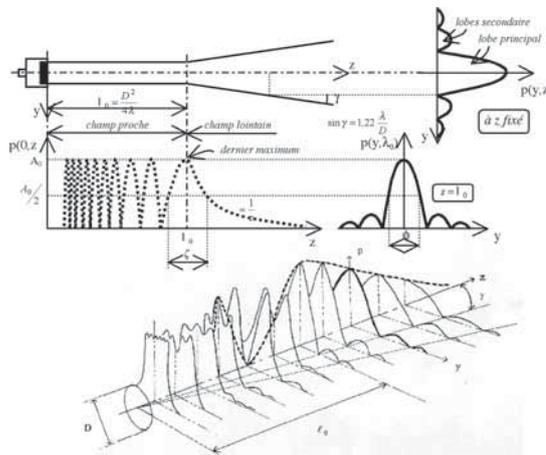


Fig. 9 : Allure du champ de pression acoustique d'un faisceau ultrasonore généré par un transducteur plan

Cas d'un signal monochromatique

Dans l'hypothèse où le transducteur est axisymétrique de diamètre D et d'axe z , et où l'élément sensible du transducteur est excité par un signal temporel sinusoïdal de fréquence f , l'amplitude de la pression acoustique $p(y,z)$ de l'onde émise dans l'espace, a la forme représentée sur la figure 9. Deux zones sont à distinguer : la zone de champ proche (ou zone de Fresnel) où le champ de pression est très irrégulier, et la zone de champ lointain (ou zone de Fraunhofer) où le champ de pression s'évase et a un angle de divergence γ avec l'axe z du transducteur tel que :

$$\sin \gamma = 1,22 \frac{\lambda}{D} = 1,22 \frac{V}{fD} \quad (2)$$

où λ est la longueur d'onde dans le milieu considéré et V la vitesse de propagation des ondes ultrasonores. Cet angle de divergence correspond à la position du premier zéro du lobe principal de la pression acoustique, à z fixé. La limite de champ proche l_0 est telle que :

$$l_0 = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4V} \quad (3)$$

Cas d'un signal impulsionnel

Dans le cas où l'élément sensible du transducteur est excité par un signal temporel impulsionnel, un maximum d'amplitude de pression est observé à la limite de champ proche l_0 pour la fréquence dominante f . L'angle de divergence γ dépendant de la fréquence, à z fixé, la position des zéros de la pression acoustique change pour chacune des fréquences composant le spectre du signal. La contribution de toutes les composantes spectrales provoque alors une sorte de lissage de la courbe.

Par utilisation de l'Eq. (2), il apparaît qu'un faisceau sera d'autant plus directif que le diamètre du transducteur sera grand et/ou que la fréquence sera élevée.

Transducteurs focalisés

On a vu au § : « Différents types de transducteurs » que les transducteurs focalisés concentrent le faisceau ultrasonore autour d'un point. Par rapport à un transducteur plan, la focalisation a pour effet de rapprocher le dernier maximum de la pression acoustique $p(0,z)$ sur l'axe acoustique, et d'augmenter l'amplitude de ce maximum (voir Fig. 10). La distance focale acoustique (ou plus simplement focale acoustique) f_{ac} est donnée par la position de ce dernier maximum.

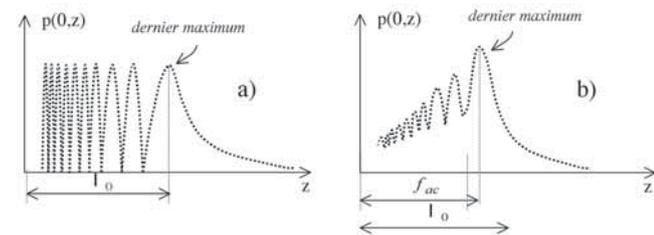


Fig. 10 : Effet de la focalisation sur l'amplitude du champ de pression acoustique sur l'axe du transducteur.

Comparaison des champs pour un transducteur plan (a) et un transducteur focalisé (b)

Obtention de la focalisation

Divers moyens sont utilisés pour focaliser les faisceaux ultrasonores, citons :

- Lame piézo-électrique incurvée de rayon de courbure R
La distance focale est égale au rayon R .
- Focalisation électronique

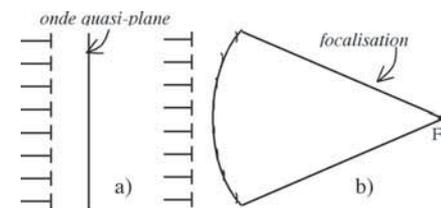


Fig. 11 : Focalisation électronique. Excitations identiques pour tous les transducteurs (a) ou décalées dans le temps (b)

Très utilisée dans le domaine médical, cette focalisation utilise un grand nombre de transducteurs élémentaires dont on décale l'excitation. En effet, si tous les transducteurs étaient excités en même temps, l'onde résultante serait une onde quasiment plane. Dans le cas où, grâce à des retards électroniques, les transducteurs du bord sont excités en premier, et ensuite ceux du centre, on peut créer une onde résultante sphérique (voir Fig. 11). Un des intérêts d'un tel système est de pouvoir changer rapidement la focalisation.

- *Lentille acoustique*

Comme en optique, on accole à l'élément piézo-électrique une lentille qui peut être moulée directement sur la face avant du transducteur. Contrairement à l'optique, la focalisation nécessite une lentille concave pour obtenir une convergence du faisceau, car le matériau utilisé pour la lentille a généralement une vitesse de propagation plus grande que le milieu de propagation dans lequel vont être créées les ondes (voir Fig. 12).

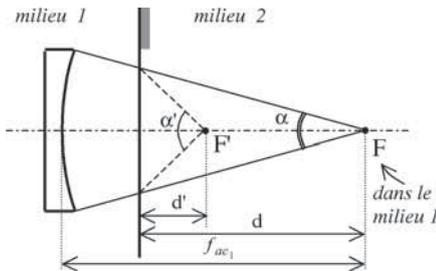


Fig. 12 : Focalisation dans l'eau par lentille acoustique

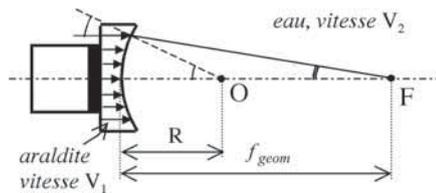


Fig. 13 : Focalisation dans un autre matériau que l'eau

Focalisation après la traversée d'une interface plane

On utilise un transducteur focalisé plongé dans l'eau pour contrôler une pièce, dont l'interface d'entrée est plane (voir Fig. 13). Les vitesses des ondes longitudinales dans l'eau et le milieu, sont respectivement V_1 et V_2 telles que $V_1 < V_2$. La présence de l'interface provoque un rapprochement du point focal F dans l'eau en F', point focal dans la pièce. On notera que ce n'est pas la distance focale qui change, mais la variation de vitesse entre l'eau et la pièce qui rapproche le point focal à partir de l'interface.

Caractérisation du champ en échographie

Quand les transducteurs sont utilisés en échographie (le même transducteur est utilisé en émission et réception), une caractérisation spatiale simple du champ consiste à définir la zone à -6 dB. C'est la zone dans laquelle un petit diffuseur (petit devant la longueur d'onde) délivre un signal d'amplitude plus grande que la moitié de l'amplitude maximale (pour un transducteur plan, cette amplitude maximale étant obtenue pour une position du diffuseur sur l'axe et à la distance l_0 et pour un transducteur focalisé au point focal). Cette zone est bien sûr axisymétrique autour de l'axe du transducteur (voir Figs. 9 et 14). Cette zone est caractérisée par la profondeur de champ ξ et la largeur ϕ .

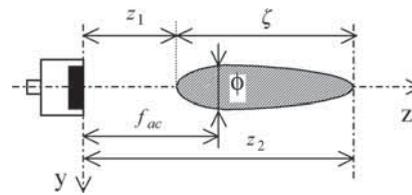


Fig. 14 : Caractérisation de la zone à -6dB en échographie pour un transducteur plan ($f_{ac}=l_0$) ou pour un transducteur focalisé

Références bibliographiques

- [1] D. Royer, E. Dieulesaint, «Ondes élastiques dans les solides», Tome I : Propagation libre et guidée, Masson, (1996)
- [2] J. Perdjon, «Le contrôle non destructif par ultrasons», Traité des Nouvelles Technologies, Série Mécanique, Hermès, (1993)
- [3] A. Zarembowitch, «Les ultrasons», Que sais-je ? n° 21, Presses Universitaire de France, (2003)
- [4] P.D. Edmonds Ed., «Ultrasonics», Methods of Experimental Physics Vol 19, Academic Press, (1981)