



FRNC-CONF-144
FR7700838

EIGHTH WORLD CONFERENCE ON NONDESTRUCTIVE TESTING

HUITIEME CONFERENCE MONDIALE
SUR LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS

3F5

1N1S

APPLICATIONS OF PRECISION ULTRASONIC THICKNESS GAUGING APPLICATIONS DE LA MESURE DE PRECISION DES EPAISSEURS PAR ULTRASONS

FOWLER K.A. - ELFBAUM G.M.
HUSAREK V. - CASTEL J.G.

WALTHAM
SARTROUVILLE

PANAMETRICS
SOFRANEL-SM Française d'Electrophysique

U.S.A.
FRANCE

SUMMARY :

Pulse-echo ultrasonic thickness gauging is now recognized as an accurate method of measuring thickness of a product from one side when the velocity of ultrasound in the material is known. The advantages and present limitation of this gauging technique are presented, together with several applications of industrial interest.

RESUME :

Le procédé ultrasonore par échos est maintenant admis comme une méthode très précise permettant de mesurer l'épaisseur d'un produit à partir d'une seule face, à condition que la vitesse du son dans le matériau soit connue. Les avantages de cette technique sont présentés, avec ses limites, ainsi que différentes applications présentant une importance et un intérêt industriels.

I - INTRODUCTION

Au cours des dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la mesure de précision des épaisseurs par ultrasons, grâce à une meilleure conception des palpeurs et à l'utilisation de composants électroniques de pointe. La supériorité évidente des ultrasons est de permettre une mesure rapide de l'épaisseur de pièces où l'accès simultané aux deux faces est difficile ou impossible. La mesure des épaisseurs par ultrasons est une technique très souple, applicable aux matériaux et aux formes de pièces les plus variés, et pouvant être appliquée le plus souvent par des opérateurs sans qualification particulière.

Nous nous bornerons dans cette communication aux techniques de mesure de précision des épaisseurs utilisant un seul palpeur travaillant par échos ou en émetteur / récepteur. Nous traiterons essentiellement les mesures faites manuellement, par opposition avec les mesures en continu en cours de fabrication, ou avec les mesures à cadence élevée. Nous décrivons enfin les techniques utilisant des palpeurs à contact direct, des palpeurs à ligne à retard, et des palpeurs technique par immersion.

II - PRINCIPES DE LA MESURE

L'épaisseur d'une pièce ou d'un assemblage est déterminée à l'aide d'un mesureur d'épaisseurs utilisant le principe de l'échographie ultrasonore; ce dispositif mesure avec précision le temps mis par une brève impulsion ultrasonore pour traverser l'épaisseur du matériau, se réfléchir sur la paroi opposé (ou sur une interface) et revenir au palpeur émetteur. Ce temps de parcours aller - retour est multiplié par la vitesse du son dans le matériau et divisé par deux, afin de tenir compte des deux parcours. Ceci est exprimé par la relation bien connue :

$$e = \frac{V \times T}{2}$$

où e = l'épaisseur à mesurer
V = la vitesse du son dans le matériau
T = le temps mesuré pour le parcours aller-retour.

La fig.1 représente le schéma de principe général d'un mesureur d'épaisseurs ultrasonore à affichage digital. D'après cette figure, une impulsion de tension unidirectionnelle à large bande est envoyée par l'émetteur à un palpeur ultrasonore à large bande fortement amorti. La pénétration de cette impulsion dans la pièce en examen est assurée par un produit de couplage liquide. Les échos renvoyés par la paroi opposé ou par une

interface dans la pièce en examen reviennent au palpeur, et par conséquent au préamplificateur du récepteur. Les circuits logiques de contrôle et de réglage servent à la fois à synchroniser l'émetteur et à sélectionner les échos qui serviront à mesurer l'intervalle de temps. Lorsque ces échos ont été identifiés par la logique de contrôle, l'intervalle de temps qui les sépare est mesuré avec précision et transmis aux circuits de conversion du temps de parcours, qui multiplient alors le temps par la vitesse du son affichée sur le système de compensation de la vitesse du son dans le matériau, et l'épaisseur est affichée sous forme numérique. Mises à part quelques variantes dans les circuits électroniques, les fonctions générales sont communes à tous les mesureurs de précision.

Les différentes méthodes ultrasonores permettent de mesurer les épaisseurs peu-vent être classées suivant le type de palpeur utilisé, ou suivant le choix des échos servant à déterminer le temps de transit de l'impulsion ultrasonore dans la pièce en examen.

Dans le premier cas, on distingue trois catégories principales de mesure :

- 1 - Avec palpeur à contact direct
- 2 - Avec palpeur à ligne à retard
- 3 - Avec palpeur technique par immersion.

Dans le second cas, nous distinguerons encore trois catégories fondamentales.

Cette classification des différentes méthodes est illustrée par la fig.2, qui représente schématiquement les trois catégories par la forme du train d'ondes ultrasonores et par le type de palpeur pouvant être utilisé pour le genre de mesure considéré.

Les mesures de la catégorie 1 impliquent l'emploi des palpeurs à contact direct uniquement. Ici, l'intervalle de temps est mesuré entre une impulsion pratiquement synchrone de l'impulsion d'émission et le premier écho renvoyé de l'intérieur de la pièce mesurée. Dans la catégorie 2, l'intervalle de temps est mesuré soit entre deux échos de fond successifs de la pièce, soit entre l'écho renvoyé par une interface et le premier écho de fond. Ce genre de mesure peut être effectué aussi bien avec des palpeurs à contact direct qu'avec des palpeurs à ligne à retard ou à immersion. La troisième technique consiste à mesurer l'intervalle de temps entre deux échos de fond successifs suivant un écho d'interface, et utilise presque exclusivement les palpeurs à ligne à retard ou technique par immersion. Ces trois catégories de mesure seront décrites en détail, en précisant leurs avantages et leurs limites, ainsi que les facteurs qui influencent la précision de la mesure et les précautions à prendre lors des applications.

III - DESCRIPTION DES TROIS CATEGORIES DE MESURE D'EPAISSEURS PAR ULTRASONS

III.1 - Catégorie 1 : Mesures avec palpeurs à contact direct

Les mesures d'épaisseurs utilisant des palpeurs à contact direct sont généralement les plus simples à réaliser et sont utilisables pour des applications très diverses. L'application directe du palpeur sur la pièce assure le meilleur couplage acoustique pour la transmission du faisceau ultrasonore du palpeur dans la pièce en examen, pour la plupart des matériaux. L'emploi des palpeurs à contact direct est recommandé chaque fois que les exigences de la mesure le permettent. La fig.2 montre que cette méthode peut généralement être utilisée pour mesurer des épaisseurs au moins égales à 0,5 mm, avec une précision ne dépassant pas $\pm 0,01$ mm. Les palpeurs à contact direct sont toutefois inutilisables sur des pièces dont la température dépasse 100°C parce qu'ils sont constitués par des matériaux dont les coefficients de dilatation thermique sont très différents et qui doivent être assemblés entre eux de façon soignée afin d'obtenir les performances désirées. Des températures élevées provoquent une détérioration de l'assemblage pouvant rendre le palpeur inutilisable.

Avec cette méthode de mesure, l'intervalle de temps séparant l'impulsion d'émission du premier écho réfléchi est légèrement augmenté du fait de la face de contact du palpeur et du film de liquide de couplage intercalé entre cette face de contact et la surface de la pièce en examen. C'est pour compenser cette inexactitude inévitable que le mesureur d'épaisseurs est muni d'un réglage du zéro, dont le rôle est de commander une impulsion de départ légèrement décalée par rapport à l'impulsion d'émission. Un autre facteur qui influe sur le réglage du zéro est le temps de montée ou la fréquence de l'écho réfléchi. Il faut donc réétalonner le zéro si l'on utilise des palpeurs de fréquences différentes. Pour étalonner correctement le zéro avec un palpeur donné, deux pièces d'épais-

seurs connues et en même matériau que la pièce à mesurer sont nécessaires quand la vitesse du son dans ce matériau est inconnue. La pièce la plus épaisse permet d'ajuster le réglage de la vitesse dans le matériau, et la pièce la plus mince sert à établir l'étalonnage correct du zéro. Le palpeur est appliqué alternativement sur la pièce la plus épaisse et sur la pièce la plus mince, tandis qu'il est procédé au réglage de la vitesse du son et du zéro. L'étalonnage du mesureur d'épaisseurs est correct quand les épaisseurs affichées sont exactes pour les deux pièces. Quand la vitesse du son dans le matériau est connue, seul l'étalonnage du zéro est nécessaire en cas de changement de palpeur.

Plusieurs facteurs influencent la précision et le domaine d'épaisseurs mesurables compatibles avec la méthode de mesure utilisant un palpeur à contact direct; ce sont :

III.1.1 - La précision d'étalonnage du mesureur d'épaisseurs

III.1.2 - L'état de surface de la pièce en examen

La précision de la mesure est maximale quand les deux faces de la pièce (surface de contact et paroi de fond) sont lisses. En cas de rugosité de la surface de contact, l'épaisseur minimale mesurable est plus grande en raison de la réflexion du son dans le film plus épais de produit de couplage. Si par contre c'est la paroi opposée de la pièce qui est rugueuse, l'écho qu'elle renvoie sera déformé et irrégulier, et il en résultera une moindre précision de la mesure.

III.1.3 - La technique de couplage acoustique

Cette technique doit être reproductible si l'on veut obtenir la précision maximale en mesurant les épaisseurs avec des palpeurs à contact direct. Il faut donc utiliser un fluide de couplage de faible viscosité et se servir du palpeur ayant le plus petit diamètre permettant encore d'obtenir de bons résultats dans tout le domaine de mesure.

III.1.4 - La courbure de la pièce mesurée

La qualité du couplage acoustique entre palpeur et pièce diminue avec le rayon de courbure. D'une manière générale, la taille du palpeur à contact direct doit être réduite quand le rayon de la courbure diminue.

III.1.5 - Une forme conique ou excentrée

Si la surface de contact et la paroi opposée ont une forme conique ou excentrée l'une par rapport à l'autre, l'écho réfléchi est déformé et la précision de la mesure est moins bonne. Bien qu'un manque de parallélisme entre les deux faces d'une pièce soit acceptable jusqu'à un certain degré, il en résulte toujours une diminution de la précision de mesure.

III.1.6 - Les propriétés acoustiques du matériau

Plusieurs facteurs sont susceptibles de réduire considérablement la précision et de limiter la gamme d'épaisseurs mesurables. Ce sont notamment :

a) La dispersion du son : Dans certains matériaux (aciers inoxydables moulés, fontes et divers alliages), l'énergie sonore est dispersée par les cristaux. Ceci rend plus difficile l'identification d'un écho effectivement renvoyé par la paroi opposée de la pièce et limite les possibilités de la mesure ultrasonore des épaisseurs.

b) Les variations de la vitesse du son : Certains matériaux présentent des différences importantes de vitesse du son d'un point à un autre. C'est le cas de certains aciers inoxydables moulés et du laiton, en raison de leurs grains relativement grossiers et de l'anisotropie de la vitesse du son qui résulte de l'orientation des grains. Dans d'autres matériaux, la vitesse du son varie rapidement en fonction de la température. Ce phénomène est caractéristique des matières plastiques, et il est indispensable de surveiller la température si l'on veut des mesures précises.

c) L'atténuation ou l'absorption du son : Dans de nombreux matériaux organiques tels que les matières plastiques et le caoutchouc, le son est très rapidement atténué aux fréquences habituellement utilisées pour les mesures d'épaisseurs par ultrasons. Ceci explique que l'épaisseur maximale mesurable dans ces matériaux soit souvent limitée.

III.1.7 - L'inversion de phase

Ce phénomène se rencontre lorsqu'un matériau à basse impédance acoustique (densité . vitesse) est ossemblé avec un matériau dont l'impédance acoustique est supérieure. En effet, la phase du signal renvoyé par l'interface entre la basse impé-

dance et le matériau à impédance élevée sera inverse de celle de l'écho normalement obtenu lorsque l'impulsion sonore est réfléchiée par une interface avec l'air. Ce phénomène est généralement compensé par un système électronique incorporé dans l'appareil, faute de quoi les mesures effectuées sont entachées d'une erreur systématique.

Le choix du palpeur à contact direct le plus approprié est basé sur un certain nombre de considérations faisant intervenir les propriétés acoustiques du matériau et la forme de la pièce à mesurer. Les résultats les plus sûrs et les mieux reproductibles sont généralement obtenus avec le palpeur de la plus haute fréquence et du plus petit diamètre possibles, garantissant néanmoins les performances désirées pour tout le domaine d'épaisseurs à mesurer. Les palpeurs de petit diamètre s'appliquent plus facilement sur la pièce à mesurer et autorisent un film de produit de couplage plus mince pour une pression d'application donnée. D'autre part, des palpeurs à haute fréquence produisent des échos dont l'amplitude augmente plus rapidement, ce qui augmente la précision de la mesure. Les propriétés acoustiques ou l'état de surface de la pièce en examen peuvent dicter le choix d'un palpeur à fréquence moins élevée si l'on veut compenser les effets d'un couplage acoustique médiocre et de l'atténuation ou de la dispersion du son dans le matériau.

Lors de mesures d'épaisseurs par contact direct sur des surfaces courbes, la dimension de l'élément piézoélectrique du palpeur devrait normalement être réduite lorsque le rayon de courbure diminue. De plus, la fig. 3 montre que la quantité de produit de couplage entre le palpeur et la surface courbe doit être aussi faible que possible. Un excès de produit de couplage provoque en effet un bruit dû à la réflexion de l'impulsion transmise dans le film de produit qui se trouve entre le palpeur et la surface courbe. Cet effet peut être atténué en diminuant la quantité de produit de couplage utilisée et en choisissant un palpeur dont la surface active sera aussi réduite que possible.

Très souvent, un petit élément piézoélectrique rectangulaire améliore le rapport signal/bruit lors du contrôle de tubes de faible diamètre. La fig. 4 fait apparaître l'avantage qu'il peut y avoir à utiliser un palpeur à contact direct muni d'un élément piézoélectrique rectangulaire de petite taille pour mesurer l'épaisseur de tubes de faible diamètre. Sur cette figure, on compare les rapports signal/bruit obtenus avec deux palpeurs de 20 MHz, l'un de 3 mm de diamètre, l'autre avec élément piézoélectrique de 1,5 x 3 mm. Si la mesure est faisable avec ces deux types de palpeur, elle est beaucoup plus facile et plus sûre avec le palpeur rectangulaire. L'élément piézoélectrique rectangulaire concentre l'énergie émise par le palpeur le long de la ligne de contact entre le palpeur et la surface du tube, ce qui diminue la probabilité d'erreurs de mesure dues au bruit produit dans le film de produit de couplage. Il existe une assez grande variété de produits pouvant assurer le couplage acoustique dans le cas de palpeurs à contact direct, mais l'expérience nous a prouvé que le glycol propylique est un produit convenant à de nombreuses applications. On donnera toutefois la préférence à la glycérine dans les cas délicats exigeant la transmission du maximum d'énergie sonore; mais la glycérine favorise la corrosion du fait de l'absorption d'eau, et son emploi peut être déconseillé dans certaines applications. Parmi les autres produits de couplage susceptibles d'être utilisés, citons le pétrole et les graisses, l'eau et les pâtes aux silicanes.

Le tableau I tente de résumer les principales applications pour lesquelles la mesure d'épaisseur par contact direct est recommandée ou impérative. Le domaine d'épaisseurs mesurables, la précision et le palpeur conseillé n'ont qu'une valeur indicative. Dans de nombreuses applications spéciales, les mesures d'épaisseur par contact direct peuvent être faites au-delà du domaine indiqué, et avec une précision supérieure à celle qui est inscrite dans le tableau. D'autre part, on peut souvent utiliser d'autres palpeurs que ceux figurant sur ce tableau.

Il convient de mentionner un cas particulier de mesures par contact direct que l'on utilise dans certaines circonstances. Dans ce cas, une mince membrane souple (0,5 mm ou moins) est intercalée entre le palpeur et la surface de la pièce en examen; l'uréthane souple s'est révélé idéal pour ce genre d'application. Lorsque la surface de la pièce en examen est lisse, plane ou légèrement courbe, la transmission de l'onde ultrasonore peut souvent se faire sans l'aide d'un produit de couplage. La prolongation du temps de parcours du fait de la membrane est compensée par étalonnage du zéro. Cette méthode donne de bons résultats, notamment pour les mesures de tuyaux ou de conduites en plasti-

que par l'intérieur. On mesurera p.ex. l'épaisseur des conduites en polymère fluoré, en utilisant un palpeur de faible diamètre revêtu d'une membrane de ce genre. Elle épouse le rayon de courbure de la conduite et permet des mesures avec une précision d'environ 0,05 mm.

III.2 - Catégorie 2 : Mesures entre échos

Les mesures de la catégorie 2 s'effectuent entre les deux premiers échos suivant l'impulsion d'émission, et sont appelées "mesures entre échos". Cette technique est souvent la seule possibilité offerte pour certaines applications, mais elle est malheureusement soumise à plusieurs sources d'erreurs potentielles, et en tout cas avant d'y recourir, il convient d'analyser avec soin chaque cas d'application. Les mesures entre échos peuvent être réalisées avec l'un ou l'autre des trois types de palpeurs, c'est-à-dire un palpeur à contact direct, un palpeur à ligne à retard ou un palpeur technique par immersion. Pour que les résultats obtenus soient précis, il faut veiller tout particulièrement à la phase de l'écho, ainsi qu'aux distorsions qui peuvent se produire.

Si l'on utilise un palpeur à contact direct pour mesurer l'épaisseur d'une pièce à impédance acoustique relativement élevée et dont les surfaces sont lisses, le second écho de fond subira une certaine distorsion de phase due à la première réflexion sur l'interface pièce en examen/palpeur. Cette distorsion suffit à provoquer une variation de plusieurs centièmes de millimètre de la valeur affichée. L'épaisseur du film de liquide de couplage modifie notablement la valeur exacte de l'épaisseur mesurée. Si le palpeur est appliqué sans exercer de pression, ce qui permet au film de produit de couplage d'occuper une certaine épaisseur, la distorsion de l'écho est moindre. C'est pourquoi il est possible, dans certaines conditions, de mesurer plus exactement l'épaisseur d'une pièce ayant une surface modérément rugueuse ou d'un tube. Ceci est représenté schématiquement sur la fig.5-1 (formes d'ondes A et B). La mesure entre échos utilisant un palpeur à contact direct ne devrait généralement pas être employée pour mesurer des matériaux à basse impédance acoustique, comme les plastiques. La fig.5-1 C montre un second écho de fond de phase opposée à celle du premier. Bien que du point de vue électronique, la mesure des épaisseurs doive être possible dans le cas d'échos en opposition de phase, il en résultera néanmoins des erreurs. Le plus souvent, il y a peu à gagner en effectuant une mesure entre échos avec un palpeur à contact direct.

Dans certaines applications, on aura avantage à utiliser un palpeur à ligne à retard au lieu d'un palpeur à contact direct. Mais il faut, ici encore, s'assurer que les échos ont la même phase, ou utiliser un appareillage capable de compenser les inversions de phase des échos, sans nuire à la précision de la mesure d'épaisseur. La fig.5-2 schématise les phases relatives des échos, telles qu'on les rencontre dans différentes applications courantes. La fig.5-2 A représente ce rapport dans le cas d'un palpeur équipé d'une ligne à retard en polystyrène et appliqué sur une pièce lisse constituée par un matériau dont l'impédance acoustique est supérieure à celle du polystyrène. Quand un palpeur à ligne à retard en polystyrène est couplé sur un tel matériau, l'écho de l'extrémité de la ligne à retard devient l'écho d'interface avec la pièce, et sa phase s'inverse. Pour faire des mesures précises dans tout un domaine d'épaisseurs, l'appareil doit être capable d'inverser la phase de l'un des échos et de mesurer, d'une manière ou d'une autre, l'intervalle de temps séparant deux points d'amplitude égale de deux échos. Il est alors possible de faire des mesures entre l'écho d'interface et le premier écho de fond, avec une précision de l'ordre de 0,003 mm. Toutefois, si la surface de la pièce est rugueuse ou courbe, l'écho de l'extrémité de la ligne à retard en polystyrène n'est que distordu, comme le montre la fig.5-2 B. Cette distorsion peut entraîner des erreurs dans les mesures faites avec un palpeur à ligne à retard sur une pièce dont la surface n'est ni plane ni lisse.

Les mesures entre échos avec le palpeur à ligne à retard constituent souvent une méthode séduisante de mesure de l'épaisseur de pièces minces en matière plastique. Ici encore, il faut tenir compte de l'impédance de la matière plastique à mesurer par rapport au polystyrène ou au matériau utilisé pour la ligne à retard. Au cas où la matière plastique à mesurer a une impédance acoustique plus élevée que celle du polystyrène, le rapport entre échos est représenté sur la fig.5-2 C. Si au contraire l'impédance acoustique de la matière plastique est inférieure à celle du polystyrène, les phases relatives des échos

sont représentées sur la fig. 5-2 D. Ici encore, pour réaliser des mesures aussi précises que possible, le mesureur d'épaisseurs doit être capable de mesurer les intervalles de t temps séparant des points de même amplitude entre échos et de compenser les inversions de phase, s'il s'en produit.

En technique par immersion, quand l'impulsion ultrasonore n'atteint la pièce en examen qu'après avoir traversé un parcours dans l'eau, la phase de l'écho d'interface est presque toujours inverse de celle de l'écho de fond. Mais si la surface de la pièce est rugueuse ou courbe, l'écho renvoyé au palpeur sera vite distordu, et même si la phase inverse est compensée, d'autres erreurs sont possibles, en raison de cette distorsion. De plus, dans le cas de matériaux à impédance acoustique relativement élevée, il y a généralement une grande différence d'amplitude entre l'écho d'interface provenant de la surface de la pièce et le premier écho de fond, en raison de la valeur élevée du coefficient de réflexion entre l'eau et le matériau constituant la pièce mesurée. Cette différence d'amplitude doit être compensée par la plage dynamique du mesureur d'épaisseurs. La technique de mesure par immersion entre échos sur des matériaux à impédance acoustique élevée devrait être réservée aux cas dans lesquels il est difficile ou impossible, pour une raison quelconque, d'obtenir deux échos de fond distincts après l'écho d'interface. Ce cas peut se rencontrer quand l'épaisseur augmente ($e > 3$ cm) ou quand la surface réfléchissante est petite ou n'est pas parallèle à la surface de contact.

La technique de mesure entre échos est souvent la seule possible pour mesurer par immersion l'épaisseur de pièces en matière plastique. La valeur élevée du coefficient de transmission entre l'eau et la matière plastique est souvent cause de la très faible amplitude du second écho de fond après l'écho d'interface; il est donc difficile de l'utiliser pour une mesure automatique de l'épaisseur. Comme le montre la fig. 5-3 B, bien que l'écho d'interface et le premier écho de fond aient une amplitude à peu près équivalente, leurs phases sont opposées. Il se produit par ailleurs une distorsion de l'écho d'interface lorsque le palpeur n'est pas parfaitement perpendiculaire à la surface de la pièce en examen, ou si celle-ci est courbe, comme sur les tuyaux en plastique. C'est pourquoi nous pensons que chaque fois que cela est possible, il est préférable d'utiliser un palpeur à contact direct afin de réduire au maximum ce genre d'imprécision.

D'une manière générale, on peut dire que la mesure entre échos est une technique ultrasonore permettant de déterminer l'épaisseur de certains produits difficiles ou impossibles à mesurer autrement. Il convient toutefois d'insister sur le fait que cette technique est susceptible d'introduire certaines erreurs de mesure qu'il faut compenser par une électronique appropriée, et qu'il est nécessaire de bien connaître l'influence de la forme et des propriétés acoustiques de la pièce en examen sur les caractéristiques de l'écho. Chaque fois que ce sera possible, nous conseillons d'employer les mesures avec palpeur à contact direct de la catégorie 1 ou les mesures de la catégorie 3, utilisant les échos multiples suivant l'écho d'interface.

III.3 - Catégorie 3 : Mesures avec palpeurs à ligne à retard et technique par immersion

La technique de mesure de la troisième catégorie consiste à mesurer l'intervalle de temps entre deux échos de fond successifs, après l'écho d'interface. Elle est généralement réservée aux mesures de faibles épaisseurs effectuées avec des palpeurs à ligne à retard ou technique par immersion. La meilleure application de cette technique de mesure concerne les matériaux dont l'impédance acoustique est supérieure à 10^6 g/cm². s. Dans ce genre de matériaux, les échos des réflexions successives ont tous la même phase, et leur amplitude relative est déterminée par le coefficient de transmission de l'énergie sonore sortant du matériau et pénétrant dans du polystyrène ou dans de l'eau. Comme ces deux éléments pour ligne à retard ont une impédance acoustique relativement basse, le rapport entre les amplitudes d'échos successifs est généralement supérieur à 0,5, ou -6 dB. Le tableau II représente la perte d'énergie relative entre échos successifs et la diminution correspondante de l'amplitude des échos qui peut être exemptée pour des lignes à retard constituées par de l'eau ou de polystyrène. Si l'on veut mesurer de cette manière des matériaux d'impédances acoustiques très différentes, la variation d'amplitude des échos successifs doit être compensée pour obtenir des mesures aussi précises que possible. Le tableau II montre toutefois que les erreurs ne doivent pas devenir trop importantes.

tant que l'impédance acoustique ne s'abaisse pas au-dessous de $3 \cdot 10^6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Dans de nombreuses applications industrielles, les mesures de la catégorie 3 avec un palpeur à ligne à retard donnent des résultats meilleurs qu'en utilisant des palpeurs technique par immersion. Les palpeurs à ligne à retard permettent de mesurer des épaisseurs comprises entre 0,1 et 5 mm ou plus, et ceci avec la plupart des mesureurs d'épaisseurs. Ils sont généralement utilisés pour déterminer l'épaisseur de matériaux en plaques et de tubes. De même que dans le cas des palpeurs à contact direct, on réduit le diamètre de l'élément piézoélectrique des palpeurs à ligne à retard lorsque le rayon de la courbure diminue.

Pour mesurer avec précision l'épaisseur de pièces usinées dont la rugosité superficielle n'excède pas 3 microns, la technique de mesure de la catégorie 3 avec palpeur à ligne à retard donnera une meilleure reproductibilité des mesures qu'un palpeur à contact direct. Ceci s'explique par le fait que les échos successifs tendent à retrancher l'épaisseur (variable) du film de produit de couplage, alors qu'elle s'ajoute à l'intervalle de temps mesuré avec un palpeur à contact direct. Mais si l'emploi du palpeur à ligne à retard permet d'augmenter la précision des mesures sur des surfaces usinées rugueuses, cela ne signifie pas pour autant que l'emploi de ce palpeur ou les mesures de la catégorie 3 en général donnent de bons résultats sur des surfaces très rugueuses ou corrodées. Du fait que deux échos successifs sont nécessaires pour mesurer les intervalles de temps, une rugosité superficielle trop importante produit une telle dispersion que l'amplitude du second écho est souvent faible.

L'emploi de palpeurs à immersion pour les mesures de la catégorie 3 oblige généralement à utiliser un oscilloscope. Il arrive fréquemment que des échos parasites ou indésirables interfèrent avec les échos de mesure, et il faut surveiller ces phénomènes sur un oscilloscope pour permettre à l'opérateur de faire des étalonnages en vue de les supprimer ou tout au moins de les atténuer. La fig. 6 illustre deux cas possibles : La fig. 6 A montre une mesure d'épaisseur avec un palpeur focalisé et un parcours d'eau approprié. Sur la fig. 6 B, l'intervalle de temps a été mesuré par erreur entre la première et la deuxième période du premier écho de fond. Ceci peut arriver fréquemment lors des mesures avec palpeurs technique par immersion, et parfois aussi avec des palpeurs à ligne à retard. Sur la fig. 6 C, l'intervalle de temps a été mesuré par erreur entre le premier écho de fond et un écho de transformation en onde transversale qui peut apparaître lorsqu'un palpeur technique par immersion focalisé est employé avec un parcours dans l'eau trop long entre palpeur et pièce. Pour obtenir une suite d'échos multiples distincts propres à effectuer une mesure d'épaisseur, un palpeur technique par immersion focalisé doit travailler à une distance beaucoup plus courte que sa distance focale. Trop près de la distance focale, des échos de transformation en onde transversale se produisent souvent. L'avantage des palpeurs par immersion est d'admettre souvent un positionnement moins rigoureux par rapport à la pièce à mesurer qu'un palpeur plan de même dimension et de même fréquence.

Il est souvent utile pour les mesures de la troisième catégorie que le mesureur d'épaisseurs soit aveuglé après le premier écho de fond servant à mesurer l'intervalle de temps. Si l'épaisseur minimale à mesurer dans une application donnée est supérieure à l'intervalle de temps durant lequel peut se produire un écho parasite ou indésirable, la zone aveuglée peut être réglée de manière à empêcher que ces échos indésirables soient pris en compte pour la mesure. La fig. 6 D montre qu'une telle zone aveuglée éliminerait les erreurs de mesure constatées sur les fig. 6 A et B.

Il existe un cas particulier de la technique de mesure de la troisième catégorie qui sert dans certaines applications. Si la pièce à mesurer a des surfaces très lisses, un film de couplant tel que de l'uréthane, de 0,5 mm d'épaisseur, peut être collé à l'extrémité de la ligne à retard en polystyrène d'un palpeur à ligne à retard. Si une zone aveuglée est prévue après l'écho d'interface polystyrène / film d'uréthane, la mesure d'épaisseur peut souvent être effectuée sans l'aide d'un fluide de couplage, afin d'éviter que soit mesuré le second écho d'interface uréthane/pièce en examen, comme le montre la fig. 7 A.

Lorsqu'on utilise ce même type de ligne à retard pour mesurer l'épaisseur de minces pièces en matière plastique, il est souvent possible de recourir à la technique de mesure de la troisième catégorie, à condition que la zone aveuglée après le premier écho

d'interface soit diminuée comme sur la fig.7 B. L'écho d'interface film d'uréthane / matière plastique joue le même rôle que le premier écho de fond dans les mesures ordinaires de la catégorie 3, et le premier écho de fond de la matière plastique sert de second écho de fond. A condition que l'impédance acoustique de la matière plastique constituant la pièce soit inférieure à celle du produit de couplage, l'écho d'interface et l'écho de fond ont la même phase.

Enfin, pour mesurer l'épaisseur de pièces à température élevée (300°C max.), les palpeurs à ligne à retard peuvent être équipés de lignes à retard en polyamide. Une graisse aux silicones peut être utilisée comme produit de couplage sur des pièces ayant un état de surface relativement bon. Le palpeur lui-même ne doit pas être soumis à des températures dépassant 100°C.

Sur le tableau III sont rassemblées les applications courantes de la mesure des épaisseurs, réalisables avec les techniques de la catégorie 3. Nous insistons encore ici sur le fait que ce tableau n'a qu'une valeur indicative.

IV - LONGUEUR DES CABLES

On considère souvent, en particulier pour les applications industrielles et les mesures sous-marines, qu'il est souhaitable d'employer un câble de grande longueur entre l'appareil et le palpeur. Jusqu'à 10 m, on ne rencontre généralement pas de grandes difficultés. Mais si l'on doit travailler avec des câbles de plus de 10 m de long, il faut porter une attention toute particulière aux problèmes d'adaptation du palpeur au câble, d'atténuation de l'écho dans le câble et, notamment pour les mesures de la première catégorie, de compensation du retard entraîné par le temps de propagation de l'impulsion dans le câble. S'il est vrai que des câbles de 50 m ont été utilisés avec succès, ils exigent en principe un étalonnage de l'appareil et des circuits d'adaptation spéciaux dans le palpeur.

V - CONCLUSIONS

Il apparaît clairement que la mesure d'épaisseurs de précision par ultrasons a largement dépassé le stade du laboratoire, et que moyennant un minimum de précautions pour les cas les plus délicats, les résultats soutiennent la comparaison avec ceux obtenus par les procédés classiques.

APPLICATIONS DE LA MESURE DE PRECISION DES EPAISSEURS PAR US

Applications	Domaine courant de mesure	Précision courante (mm)	Palpeur recom.	Observations
Plaques (métal ou céramique)	2 mm à 40 cm	±0,02 à 0,2	D	Précision fonction de l'état de surface
Plaques (matière plastique)	6 mm à 5 cm	±0,03 à 0,2	D, B	Précision limitée par l'homogénéité de la température et par l'atténuation
Feuillards plans (métal ou céram.)	0,5 mm à 6 mm	±0,01	F, H	Rugosité superficielle 1 micron ou meilleure
Feuillards plans (matière plast.)	0,3 mm à 6 mm	±0,01 à 0,04	F, H	Domaine de mesure limité par l'atténuation; précision limitée par les variations de température
Tubes (métal)	2 mm à 10 mm	±0,01	F	Rugosité superficielle peut limiter le domaine de mesure et la précision
Tubes (matière plastique)	2 mm à 2 cm	±0,04	D, F	Variations de température pouvant limiter la précision
Tuyaux (métal, verre)	0,5 mm à 3 mm	±0,01	H, I	Rugosité superficielle 1 micron; ϕ minimum 6 mm
Tuyaux (plastique, cuivre)	0,3 mm à 1,5 mm	±0,02	H, I	Diamètre minimum 1,5 mm
Barres, arbres	6 mm à 25 cm	±0,02 à 0,2	D, F	
Récipients (verre)	0,7 mm à 6 mm	±0,02	F, H	Rayon de courbure 6 mm minimum
Gras récipients (plastique)	0,5 mm à 6 mm	±0,02	F	Surfaces à peu près parallèles
Petits récipients (plastique)	0,3 mm à 2 mm	±0,02	H	Rayon de courbure 1 mm minimum
Aciers moulés (acier ins.)	3 mm à 2 cm	±0,02 à 0,2	D, F	Surface moulée doit être soignée ou moulée
Fentes moulées (aloues, alletres)	0,6 mm à 4 mm	±0,04	H	Surfaces à peu près parallèles
Verre épais stratifié	0,5 mm à 2 cm	±0,2	C, D	Influence de l'humidité
Revêtements (plast., caoutchouc)	0,3 mm à 20 mm	±0,04	D, F	Inversion de phase de l'écho possible
Caoutchouc (bandages de roues)	6 mm à 2 cm	±0,2	B, A	Atténuation généralement forte
Conduites (tuyaux plastiques)	1 mm à 6 mm	±0,04	C	Mesure effectuée par l'intérieur

TAB. 1 - SUMMARY OF THICKNESS MEASUREMENT APPLICATIONS WITH DIRECT CONTACT TRANSDUCER.
Résumé des applications de mesures d'épaisseurs où l'emploi du palpeur à contact direct est recommandé.

Matériau examiné	Z 10 ⁶ g/cm ²	At sur la paroi opposée				Echourles deux faces	
		Polystyrène		Fou		E ₂ /E ₁ A ₂ /A ₁	
Tungstène	10	0,89	0,94	0,97	0,98	0,94	0,97
Molybdène	6,4	0,83	0,91	0,95	0,97	0,90	0,95
Acier	4,6	0,78	0,88	0,94	0,97	0,88	0,94
Cuivre	4,3	0,76	0,87	0,93	0,96	0,86	0,93
Laiton (70 - 30)	3,7	0,73	0,85	0,92	0,96	0,85	0,92
Zirconium	3,0	0,67	0,82	0,90	0,95	0,81	0,90
Titane	2,7	0,64	0,80	0,86	0,93	0,74	0,86
Aluminium	1,7	0,50	0,71	0,84	0,92	0,71	0,84
Silice fondue	1,5	0,46	0,68	0,82	0,91	0,67	0,82
Magnésium	1,0	0,30	0,55	0,74	0,86	0,55	0,74

Palpeur recom.	Fréquence MHz	Diamètre mm
A	1	13
B	2,25	13
C	4,25	25
D	5	13
E	5	6
F	10	6
G	10	3
H	20	3
I	20	1,5 à 3

TAB. 1 - Cont'd. - Suite

TAB. II - ENERGY AND CORRESPONDING ECHO-SIGNAL AMPLITUDE LOSS PER PULSE REVERBERATION IN CLASS 3 MEASUREMENT TECHNIQUES (SEE FIGURE 2).
Perte d'énergie et diminution correspondante de l'amplitude de l'écho pour une réflexion en technique de mesure de la catégorie 3. (Voir Figure 2).

Applications	Domaine courant de mesure	Précision courante (mm)	Palpeur recom.	Palpeur recom.	Fréquence MHz	Diamètre mm
A - PALPEUR A LIGNE A RETARD						
Feuilles minces (métal, verre, céramique)	0,1 mm à 6 mm	0,003	A, B	A	10	6
Tubes à paroi minces (métal, verre, céramique)	0,2 mm à 6 mm	0,006	A, B	B	15	6
Tubes à paroi minces (de petit diamètre)	0,2 mm à 3 mm	0,006	B, C			
Métal, verre, céramique en plaques minces et lisses, plates ou légèrement courbées (couplage à sec)	0,5 mm à 6 mm	0,006	A, B, C	C	20	3
Récipients en matière plastique mince (couplage à sec ou humide)	0,3 mm à 2 mm	0,03	A, B	D	10	6
B - PALPEUR TECHNIQUE PAR IMMERSION						
Feuilles minces (métal, verre, céramique)	0,2 mm à 2 mm	0,006	D	Facal.	5	13
Feuilles minces (métal, verre, céramique)	0,5 mm à 6 mm	0,006	E			
Tubes ϕ minimum 50 mm (métal, verre, céramique)	2 mm à 6 mm	0,01	E	Facal.	20	3
Tubes ϕ minimum 25 mm (métal, verre, céramique)	1 mm à 3 mm	0,01	D			
Tubes ϕ minimum 15 mm (métal, verre, céramique)	0,5 mm à 1,5 mm	0,01	F	Facal.		6 à 25 mm

TAB. III - SUMMARY OF THICKNESS MEASUREMENT APPLICATIONS WHERE CLASS 3 MEASUREMENTS UTILIZING DELAY OR IMMERSION TYPE TRANSDUCERS ARE RECOMMENDED.
Résumé des applications de mesures d'épaisseurs où l'emploi de la technique par immersion est recommandé pour la catégorie 3, avec palpeurs à ligne à retard.

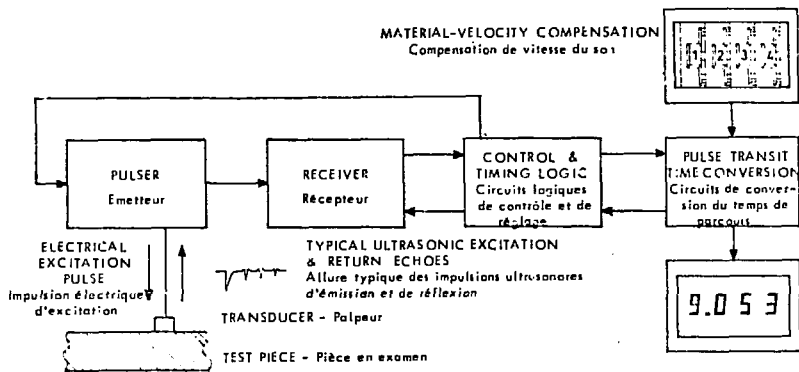


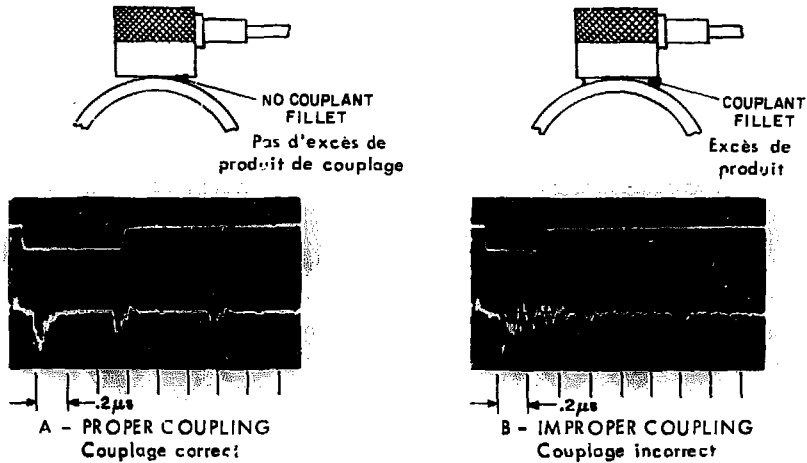
FIG. 1 - GENERALIZED BLOCK DIAGRAM OF PRECISION DIGITAL ULTRASONIC THICKNESS GAUGE SYSTEM.
Schéma de principe d'un mesureur par ultrasons à affichage digital.

CLASS Catégorie	WAVEFORM Formes d'ondes	APPLICABLE TRANSDUCER TYPES Palpeurs utilisables	APPLICABLE RANGE OF THICKNESS MEASUREMENT Domaine de mesure (+)	APPROXIMATE ACCURACY LIMITS Précision approximative
1		DIRECT CONTACT Contact direct	0,5 mm TO 2,5 m	± 0,01 mm
2		DIRECT CONTACT Contact direct DELAY LINE Ligne à retard IMMERSION Technique par immersion	1 mm TO 10 cm	± 0,003 mm
3		DELAY LINE Ligne à retard IMMERSION Technique par immersion	0,1 mm TO 4 cm	± 0,003 mm

(+) THICKNESS RANGES SHOWN ASSUME A SOUND VELOCITY OF APPROXIMATELY 0,5 cm/μs AND FURTHER ASSUME THAT MAXIMUM RANGE IS NOT LIMITED BY SOUND ATTENUATION IN THE MATERIAL.
Les domaines de mesures annoncées supposent une vitesse de propagation sonore de 0,5 cm/μs et que l'atténuation du son dans le matériau ne limite pas le maximum de mesure.

FIG. 2 - PRECISION ULTRASONIC GAUGING TECHNIQUES CLASSIFIED BY THE ECHOES USED TO MAKE THE TIME INTERVAL MEASUREMENT.
Techniques de mesure d'épaisseur de précision par ultrasons classées en fonction des échos utilisés pour mesurer le temps de transit.

APPLICATIONS DE LA MESURE DE PRECISION DES EPAISSEURS PAR US



OSCILLOGRAMS SHOW RESULTS OBTAINED WITH 10 MHz, 6 mm DIAMETER TRANSDUCER ON STAINLESS STEEL TUBE 18 mm O.D. x 6 mm I.D. USING PROPYLENE GLYCOL COUPLANT.

Les oscillogrammes montrent les échos obtenus avec un palpeur de 10 MHz, \varnothing 6 mm, sur un tube en acier inoxydable de 18 mm de diamètre extérieur et 6 mm d'épaisseur. Le couplant utilisé est du glycol propylique.

FIG. 3 - DETRIMENTAL EFFECTS OF EXCESS COUPLANT ON CONTACT TRANSDUCER THICKNESS MEASUREMENTS ON CURVED SURFACES.
Effets défavorables d'un excès de produit de couplage sous un palpeur à contact direct dans le cas d'une mesure sur une surface courbe.

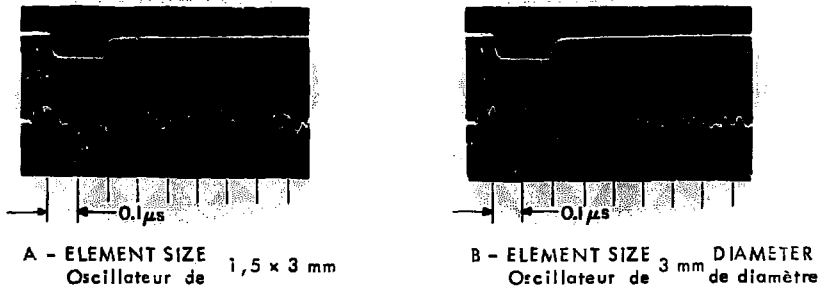
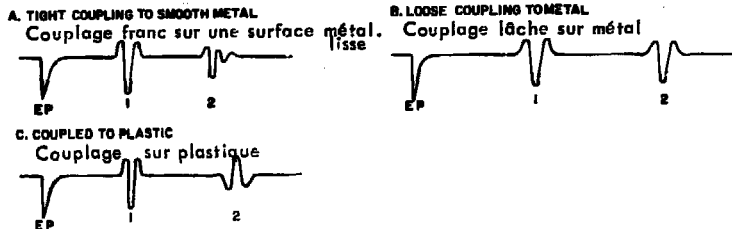
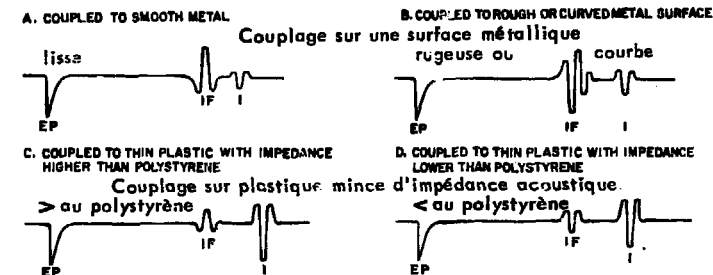


FIG. 4 - COMPARISON OF SIGNAL TO NOISE OBTAINED WITH A 20 MHz, 1,5 x 3 mm TRANSDUCER AND 3 mm DIAMETER TRANSDUCER ON A CONTACT THICKNESS MEASUREMENT ON ALUMINIUM TUBE 10 mm DIAMETER WITH 0,7 mm WALL.
Rapports signal / bruit obtenus avec palpeurs de 20 MHz, à oscillateurs l'un de 1,5 x 3, l'autre de \varnothing 3 mm, utilisés pour mesurer l'épaisseur d'un tube d'aluminium de 10 mm \varnothing et de 0,7 mm d'épaisseur.

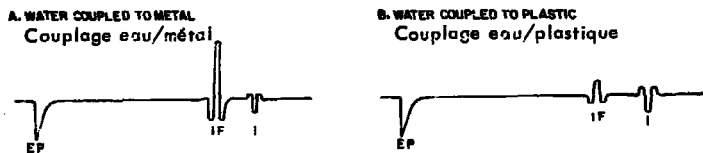
Mesure avec un palpeur à contact direct à couche de protection
 d'impédance acoustique élevée
1. CONTACT TRANSDUCER MEASUREMENTS USING TRANSDUCER WITH HIGH IMPEDANCE WEAR SURFACE.



Mesure avec un palpeur à ligne à retard en polystyrène
2. DELAY LINE TRANSDUCER MEASUREMENT USING POLYSTYRENE DELAY.



Palpeurs technique par immersion
3. IMMERSION TRANSDUCER



EP = EXCITATION PULSE = Impulsion d'émission
 IF = INTERFACE ECHO = Echo d' interface
 1,2= FIRST & SECOND BACK ECHOES = 1^{er} et 2^{ème} Echos de fond

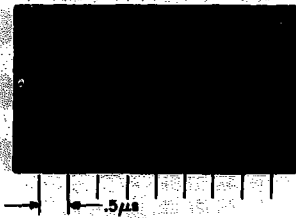
ALL WAVEFORMS ILLUSTRATED ABOVE PRESUME THE BACK OF THE TEST PIECE IS TERMINATED IN AIR

L'allure des échos représentés ci-dessus suppose que la face opposée de la pièce est en contact avec l'air

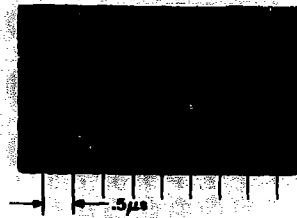
FIG. 5 - ECHO-SIGNAL POLARITY RELATIONSHIPS IN COMMON CLASS 2 ECHO TO ECHO THICKNESS GAUGING APPLICATIONS.

Relation entre les phases respectives des échos pour les principales applications de mesure d'épaisseurs en catégories 2.

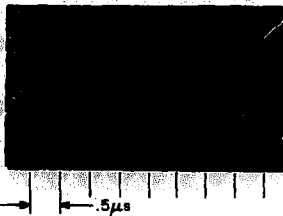
APPLICATIONS DE LA MESURE DE PRECISION DES EPAISSEURS PAR US



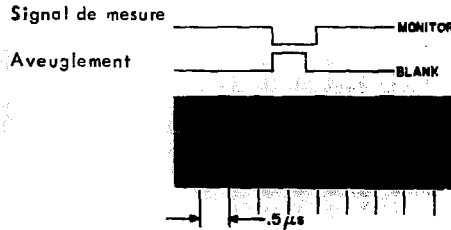
A-PROPER SETUP.
WATER PATH = 15 mm .
Positionnement correct .
Parcours d'eau = 15 mm .



B-ERRONEOUS THICKNESS MEASUREMENT, EXTRA CYCLES CAUSED BY OPERATING AT WATER PATH NEARLY EQUAL TO THE FOCAL LENGTH OF THE TRANSDUCER .
WATER PATH = 38 mm .
Mesure erronée due à des échos parasites provoqués par un parcours d'eau égal à la distance focale du palpeur . Parcours d'eau = 38 mm .



C-ERRONEOUS THICKNESS MEASUREMENT CAUSED BY MODE CONVERTED SHEAR RESULTING WHEN SECOND BACK ECHO IS NEAR FOCAL OF TRANSDUCER. WATER PATH = 30 mm .
Mesure erronée due à une transformation en onde transversale lorsque le second écho de fond est voisin de la distance focale du palpeur .
Parcours d'eau = 30 mm .

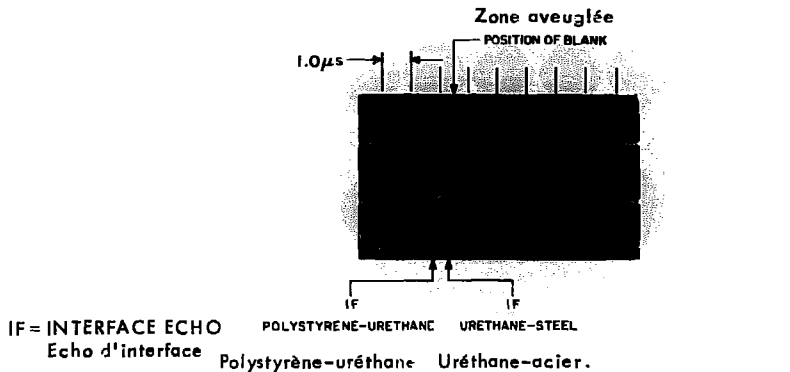


D-SCHEMATIC OF BLANK THAT CAN BE USED TO MAKE MEASUREMENTS MORE RELIABLE OVER LIMITED THICKNESS RANGE .
Principe de l'aveuglement qui peut être réalisé pour effectuer des mesures plus reproductibles dans un domaine d'épaisseur limité .

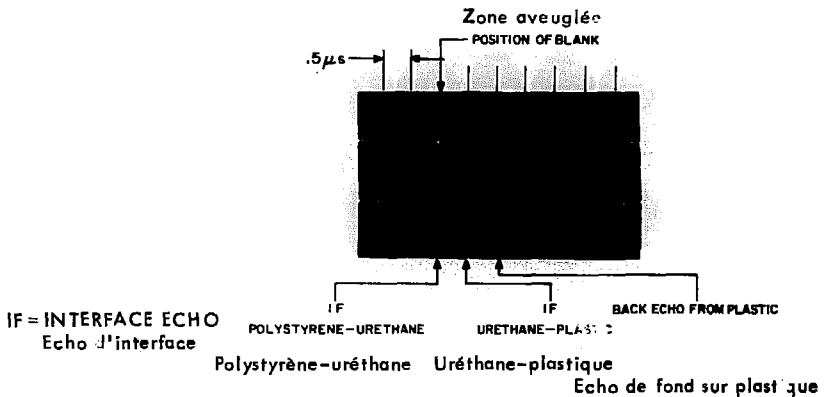
ALL OSCILLOGRAMS WERE MADE USING THE SAME 5 MHz, 13 mm DIAMETER TRANSDUCER FOCUSED AT 50 mm IN WATER. TEST PIECE-STEEL 2,5 mm THICK.
Tous les oscillogrammes ont été relevés en utilisant le même palpeur de 5 MHz, Ø 13 mm, focalisé à 50 mm dans l'eau pour une épaisseur d'acier de 2,5 mm .

FIG. 6 - OSCILLOGRAMS ILLUSTRATING ECHO-SIGNAL WAVEFORMS ENCOUNTERED IN CLASS 3 MEASUREMENTS WITH IMMERSION TRANSDUCERS.
Oscillogrammes montrant l'allure des échos obtenus pour des mesures de la catégorie 3 en technique par immersion .

APPLICATIONS DE LA MESURE DE PRECISION DES EPAISSEURS PAR US



A - 10 MHz, 6 mm DIAMETER DELAY TYPE TRANSDUCER DRY COUPLED TO SMOOTH STEEL TEST PIECE 2,5 mm THICK.
Palpeur à ligne à retard 10 MHz, Ø 6 mm, couplé à sec sur une pièce lisse en acier de 2,5 mm d'épaisseur.



B - SAME TRANSDUCER AS 7-A DRY COUPLED TO THIN PLASTIC, 0,5 mm THICK.
Même palpeur qu'en 7-A, couplé à sec sur un plastique mince de 0,5 mm d'épais.

FIG. 7 - CLASS 3 THICKNESS MEASUREMENT EMPLOYING A DELAY LINE WITH COMPLIANT MEMBRANE.
Mesures d'épaisseurs de la 3^{ème} catégorie avec un palpeur à ligne à retard et membrane de couplage.

