

# Étude de la méthode TOFD

Alice DINSENMEYER & Thomas LECHAT

## Résumé

Une plaque possédant une soudure ayant des défauts connus est contrôlée à l'aide de la méthode TOFD. L'identification des différents signaux acquis est faite au moyen d'un calcul simple des temps de vols des différentes ondes mises en jeu. Les inhomogénéités sont alors visibles car de nouveaux échos apparaissent quand l'onde se diffracte sur les défauts. Dans un second temps, une méthode de mesure simultanée de l'épaisseur ainsi que de la vitesse des ondes est présentée puis testée. Celle-ci est facile à mettre en place mais nécessite de prendre plusieurs mesures pour augmenter la précision.

## I. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du cours de Master 2 de contrôle non destructif. Cette discipline regroupe tout les procédés permettant la caractérisation d'une pièce ou d'un matériau sans en altérer les propriétés. En particulier, un grand nombre de méthodes basées sur la propagation des ondes élastiques ont été développées.

Notre travail porte sur la méthode TOFD : "Time Of Flight Diffraction", c'est à dire : "mesure du temps de vol de l'onde diffractée". Celle-ci consiste à analyser les temps de vol d'un paquet d'onde acoustique s'étant diffracté sur les bords d'un défaut. Cette méthode permet donc de caractériser la géométrie du défaut en plus de confirmer ou d'infirmer son existence. Cette méthode a tout d'abord été développée par Maurice Silk [Silk1] dans les années 70. Elle est reconnue comme particulièrement pertinente pour le contrôle des soudures. C'est sur ce dernier cas que porte notre étude.

## II. Description du banc de mesure

La méthode TOFD est ici utilisée sur une plaque d'acier comportant déjà des défauts connus. Un émetteur génère une onde de volume qui se diffracte sur le défaut puis, un capteur mesure cette diffusion. Un schéma du dispositif expérimentale se trouve en figure 1.

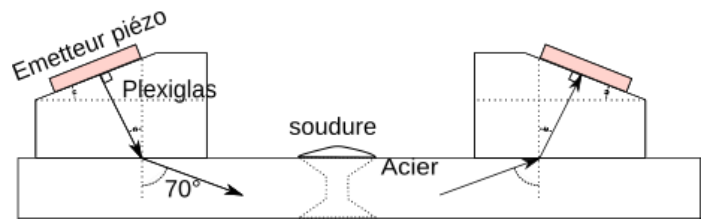


Figure 1 – Schéma du banc d'expérience.

Les transducteurs utilisés sont des capteurs piézo-électriques Olympus (C544-SM) d'une largeur de 6.35 mm, avec une bande passante centrée sur 10 MHz. Ces transducteurs sont montés sur des sabots Olympus (ST1-70L-IHC) permettant d'envoyer une onde longitudinale dans l'acier avec un angle d'incidence  $\theta = 70^\circ$ .

La plaque utilisée est de 20 mm d'épaisseur. En son centre se trouve une soudure dont les défauts sont connus à l'avance et répertoriés dans le tableau 2.

Type de défaut	Taille	Position
Center line crack	21 mm	46 mm
Lack of side wall fusion	25 mm	147 mm
Porosity	27 mm	213 mm

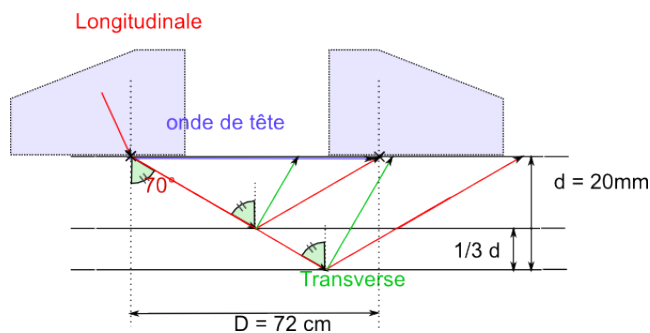
Figure 2 – Liste des défauts dans la soudure

Les mesures sont faites via un boîtier Sonatest.

### III. Calcul des temps de vol des différentes ondes d'intérêts

Afin de pouvoir déterminer quelles ondes correspondent aux signaux des mesures, il est nécessaire de calculer les temps de vol de celles-ci. Trois types d'ondes interviennent dans la mesure : les ondes longitudinales (L) générées par la source, les ondes transversales (T) générées par conversion de modes lors de la réflexion sur l'arrière de la plaque, et enfin l'onde de tête (une onde L qui reste en surface). Les vitesses des différents types d'ondes sont dans un premier temps supposées connues ( $V_L = 5900 \text{ m/s}$  et  $V_T = 3200 \text{ m/s}$ ).

Afin de concentrer le maximum d'énergie au niveau des éventuels défauts, il est nécessaire de placer les transducteurs de tel sorte que les faisceaux se croisent au 2 tiers de l'épaisseur de la plaque. Les transducteurs doivent donc être placés à une distance  $D = \frac{2d}{3} \tan(70^\circ) = 72,5 \text{ mm}$  l'un de l'autre. Les différents faisceaux sont représentés sur le schéma de la figure 3.



**Figure 3** – Schéma des parcours des différentes ondes pour une focalisation au 2 tiers du matériau et sans focalisation.

Après calculs, on obtient les distances et temps de vol répertoriés dans le tableau 4 pour les différentes ondes mis en jeu dans le cas d'une réflexion sur un éventuel défaut et sans défaut.

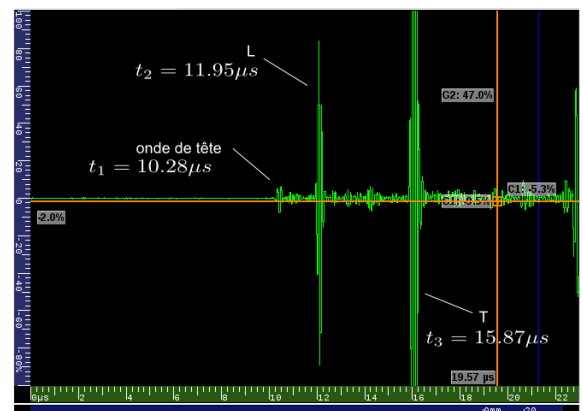
	distance	temps de vol
onde tête	76 mm	12.8 $\mu\text{s}$
onde L	116 mm	19,6 $\mu\text{s}$
onde T	78 mm	24,4 $\mu\text{s}$

---

	distance	temps de vol
onde tête	76 mm	12.8 $\mu\text{s}$
onde L	78 mm	13.2 $\mu\text{s}$
onde T	54.2 mm	16.9 $\mu\text{s}$

**Figure 4** – Distance et temps de vol des faisceaux : Sans défaut puis avec défaut

Une première mesure est faite sur une partie de la plaque sans la soudure afin de pouvoir estimer la précision de ces calculs. La figure 5 représente les différents échos mesurés pour la configuration du dessus.



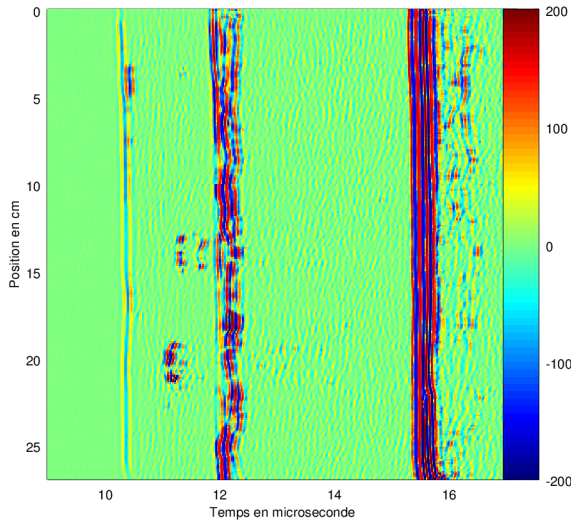
**Figure 5** – Mesure des temps de vol des différentes ondes pour une plaque de 20mm d'épaisseur sans soudure ni défauts.

La mesure diffère de l'estimation faite précédemment : la largeur du faisceau n'a pas été prise en compte, or celle-ci n'est pas négligeable pour un capteur de 6 mm. La divergence du faisceau est, elle aussi, négligée. Enfin, il manque au calcul précédent le temps nécessaire pour que les ondes L parcourent les sabots à l'émission comme à la réception. Cependant, c'est surtout l'ordre des ondes qui importe : au vu des différents trajets (et des vitesses), l'onde de tête arrive la première, puis vient la L et enfin la T.

On peut donc facilement identifier ces ondes dans la suite.

#### IV. Scan de la soudure

On utilise maintenant le dispositif sur la soudure. La figure 6 montre les signaux pour un balayage sur toute la plaque. La mesure a été effectuée 3 fois, les données ayant été quasi-identiques, seule la première mesure est présentée ici. Le gain est fixé à 60dB : les échos diffractés sont de bien plus faibles amplitudes que les signaux d'excitations, un gain élevé est donc nécessaire.



**Figure 6** – Scan d'une plaque avec une soudure possédant 3 défauts connus.

Des pics apparaissent bien aux endroits où sont censés se trouver les défauts (tableau 2). Le premier défaut se situe proche de la surface, l'onde de tête est donc plus affectée par celle-ci. La longueur du défaut est d'environ 20 mm, ce qui semble corroboré par la fiche technique des défauts dans la plaque.

Le troisième défaut est de type porosité, c'est pourquoi la tache est plus étendue que pour les 2 autres défauts : la multidiffusion des micro-bulles est bien visible. Là encore, la taille de la tache est bien celle présente dans la documentation.

Enfin le deuxième défaut est visible sous la forme de 2 échos très rapprochés : ceux-ci correspondent

en théorie à la diffraction par le bord supérieur ainsi que le bord inférieur du défaut, il est donc possible de remonter à la "largeur" du défaut (ou plutôt une projection de la largeur du défaut dépendant de l'angle entre l'incidence et le défaut). L'écart entre les 2 signaux est d'environ  $dt = 0.4 \mu s$ . On obtient donc un défaut d'une épaisseur de :  $d = 0,4 \cdot 10^{-6} V_L = 2.36 \text{ mm}$  se qui ne semble pas invraisemblable. L'absence de cette information dans la documentation nous empêche de confirmer cette mesure.

#### V. Mesure simultanée de la vitesse et de l'épaisseur par méthode de pitch&catch

Il n'est pas toujours facile de connaître l'épaisseur de la plaque ainsi que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans celle-ci. Cette partie décrit une méthode permettant de calculer ces 2 paramètres à l'issue de 2 mesures. Celle-ci est présentée dans l'article [YSSJ] : le but est d'effectuer 2 mesures de temps de vol dans un morceau de la plaque sain puis d'en déduire l'épaisseur ainsi que la vitesse des ondes à partir des formules suivantes :

$$d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_2^2 T_1^2 - L_1^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{L_2^2 - L_1^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (2)$$

$T_1$  et  $L_1$  correspondent au temps de vol ainsi qu'à la distance entre les transducteurs pour la configuration 1,  $T_2$  et  $L_2$  correspondent à la configuration 2. Le seul paramètre changeant d'une configuration à l'autre est la distance entre les capteurs (on doit avoir  $L_2 > L_1$ ). La mesure faite précédemment pour une plaque sans soudure est reprise ici ( $L_1 = 76 \text{ mm}$ ), une deuxième mesure est effectuée pour une distance  $L_2 = 130 \text{ mm}$ . On obtient les paramètres suivants :

$$T_1 = 12 \mu s, T_2 = 23.5 \mu s \quad (3)$$

$$L_1 = 76 \text{ mm}, L_2 = 130 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} d = 21.7 \text{ mm} \\ v = 5200 \text{ m.s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

Le calcul de la distance est donc assez précise (moins de 10% d'erreur) mais celui de la vitesse l'est

moins. Une imprécision sur la mesure des temps de vol peut être à l'origine de ces imprécisions. Pour s'affranchir de ce problème, les auteurs de l'article préconisent d'effectuer plus de mesures à différentes distances puis d'utiliser une méthode de moindre carré afin de grandement augmenter la précision de la mesure.

Contrôler l'épaisseur d'une plaque peut s'avérer utile par exemple dans le cadre du contrôle de cuves ou l'érosion est susceptible de ronger le conteneur.

## VI. Conclusions et perspectives

La méthode TOFD possède plusieurs avantages qui expliquent sa large utilisation dans les problématiques industrielles : le scan peut être très rapide car un seul balayage suffit en principe pour contrôler toute une plaque (dans la pratique la zone se trouvant sous chaque capteurs n'est pas parcourue). De plus les dimensions du défaut peuvent être obtenus assez simplement : cela permet un suivi de l'endommagement de la pièce.

Cependant il ne faut pas perdre de vue que cette méthode a plusieurs inconvénients notables : les ondes diffractées sont de faibles amplitudes, c'est pourquoi il est difficile de détecter des petits défauts se trouvant sur la face opposée à celle parcourue par les transducteurs. Augmenter énormément le gain n'est pas une bonne solution car il apparaît alors un champ diffus lié aux petites inhomogénéités du

matériau. Or celles-ci ne sont pas des indicateurs de l'endommagement. Pour cette raison, cette méthode n'est pas adaptée aux matériaux granulaires tels que le béton. De plus, dans la pratique, il peut être difficile d'évaluer les dimensions du défaut car si celui-ci est trop petit les différents échos sont confondus. Pour toutes ces raisons, la caractérisation des défauts nécessite une grande expérience de la part du technicien de mesures.

## Références

- [Silk1] M. G. Silk and B. H. Lidington, 1975  
*Defect sizing using an Ultrasonic Time Delay Approach* Br. J. NDT March, pp.33–36
- [Silk2] M. G. Silk, 1979  
*The transfer of ultrasonic energy in the diffraction technique for crack sizing* Ultrasonics May, pp. 113–120
- [Silk3] M. G. Silk, 1997  
*Sizing Crack-like Defects by Ultrasonic Means* In Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 3, pp. 51–79, (1997), Academic Press, New York
- [YSSJ] Young H Kim, Sung-Jin Song & Jeong-Ki Lee, 2003  
*Simultaneous measurements of the ultrasonic wave velocity and thickness of a solid plate made from one side of the plate*