



UNIVERSITÉ
LAVAL

Contrôles de matériaux par tests non destructifs utilisant les ultrasons et les courants de Foucault

Louis Bélanger Sansoucy – 536 784 684
Olivier Demers – 111 266 236

présenté à
Prof. Simon Rainville et Prof. Michel Piché

Dans la cadre du cours
Travaux Pratiques Avancés
GPH-3000

Université Laval
Date de l'expérimentation : 22 septembre 2022

Résumé

Les tests non-destructifs permettent de trouver des failles et des imperfections à l'intérieur même d'une pièce sans avoir à l'endommager. Dans ce laboratoire, des ultrasons ont été utilisés pour mesurer la taille de différents cylindres en aluminium, calculer le coefficient d'absorption de l'aluminium et de l'acrylique, ainsi que pour détecter une cavité dans un bloc d'aluminium. Ces ultrasons ont été générés à l'aide d'un transducteur et d'un pulseur et les échos ont pu être observés sur un oscilloscope. Les mesures des différentes tailles de cylindre ont donné des résultats correspondants à la mesure réelle des pièces, soit de 7.5, 5 et 2.5 cm avec une précision de ± 0.1 cm. Le coefficient d'absorption dans l'acrylique a été calculé à environ 1200 dB/m et de 500 dB/m pour l'aluminium, mais les mesures ne semblent pas être très fiables. La cavité dans le bloc d'aluminium, quant à elle a pu être trouvée et semble être de forme rectangulaire environ au centre de la pièce.

Des tests utilisant les courants de Foucault ont également été effectués pour déterminer l'emplacement d'une cavité dans un autre bloc d'aluminium, ainsi que pour mesurer l'épaisseur de la peinture sur un autre morceau métallique. Pour procéder aux mesures, un pont de Wheatstone a été équilibré avec 2 bobines, puis, en bougeant une d'entre elles, il était possible de mesurer une variation d'impédance qui se traduit par l'emplacement d'une cavité ou une plus grande épaisseur de peinture. La cavité trouvée semblait être d'une longueur d'environ 5.5cm et orientée à un angle d'environ 30°. Pour ce qui est de la peinture, 4 épaisseurs ont été mesurées, soit de 0.07, 0.14mm, 0.21mm et 0.12mm.

L'utilisation d'un de ces moyens de mesure peut facilement être utilisé en industrie pour valider que les différentes composantes d'un système sont toujours en bon état pendant que celui-ci fonctionne.

1 Introduction

Les tests non destructifs sont utilisés pour déterminer l'état de certaines composantes de systèmes industriels, sans avoir à arrêter la production et sans avoir à briser la pièce à inspecter. Parmi les techniques utilisées, on retrouve l'utilisation d'ultrasons et l'utilisation de courants de Foucault.

Le but principal de l'expérience était d'utiliser ces deux méthodes pour déterminer l'emplacement de cavité dans certaines pièces. Il a également été question de caractériser l'absorption des ultrasons dans différents matériaux pour déterminer l'impact du matériel sur la propagation de l'onde sonore. Les courants de Foucault ont aussi été utilisés pour déterminer l'épaisseur de différentes couches de peintures sur une pièce métallique.

Dans le présent rapport, une introduction aux différents phénomènes physiques utilisés sera présentée dans la section 2. La méthodologie utilisée pour procéder aux différentes mesures sera expliquée en détail à la section 3. Ensuite, les résultats des différentes mesures seront montrés dans la section 4. Finalement, une discussion des résultats obtenus, ainsi qu'une conclusion de l'expérimentation seront présentés aux sections 5 et 6.

2 Théorie

2.1 Ultrasons

Les ondes sonores peuvent se déplacer dans un matériau à une certaine vitesses, caractéristique du matériau. Cette propagation peut être caractérisée par une "impédance acoustique" qui est simplement le ratio entre la pression dans le matériau (P) et la vitesse des particules (V) en un point.

$$Z = \frac{P}{V} \quad (2.1)$$

Lorsque l'onde sonore passe d'un milieu à un autre et que l'impédance acoustique change, une partie de l'onde sonore est transmise dans le nouveau milieu, alors qu'une autre partie de l'onde est réfléchiée dans le milieu initial. Cette réflexion peut être décrite par un coefficient de réflexion qui est déterminé par le ratio entre la différence des impédances et la somme de celles-ci :

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.2)$$

Cette onde sonore réfléchiée peut ensuite être captée. Le retour de l'onde sonore est appelé *écho* et c'est en mesurant le temps entre l'onde émise et l'onde réfléchiée qu'il est possible de déterminer la taille de l'échantillon à mesurer.

$$d = \frac{vt}{2} \quad (2.3)$$

Où :

d : La taille de l'échantillon (ou la distance au prochain changement d'impédance).

v : La vitesse de propagation de l'onde dans le matériau.

t : Le temps entre les échos.

La division par 2 est nécessaire, car l'onde sonore doit compléter un aller-retour dans le matériel avant d'être captée.

L'onde sonore est également absorbée dans le matériau. Le coefficient d'absorption qui caractérise cet effet est également propre au matériau. L'onde sonore est absorbée en suivant une exponentielle décroissante caractérisée par l'équation suivante :

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} \quad (2.4)$$

Où :

$P(x)$: La pression en un point dans le matériel (l'intensité de l'onde sonore).

P_0 : La pression au point $x = 0$ (l'intensité initiale de l'onde sonore).

α : Le coefficient d'atténuation.

x : La position dans le matériau.

En réarrangeant les termes pour isoler le coefficient d'absorption, on obtient :

$$\alpha = -\frac{20}{x} \log_{10} \frac{P(x)}{P_0} \quad (2.5)$$

Il est important de noter que les équations présentées sont valides à incidence normale. Si le son arrive à un angle différent qu'à incidence normale (par exemple, sur une surface courbe), il ne sera pas réfléchi vers la source, ce qui peut grandement nuire à la mesure d'une distance et rend invalide l'équation 2.3 [2].

2.2 Courants de Foucault

Le principe de base de l'utilisation des courants de Foucault pour prendre des mesures est qu'un courant circulant dans une bobine de fil crée un champ magnétique qui, à son tour, induit un champ électromagnétique dans la pièce de métal placée à proximité. Ce champ est inverse et opposé au champ magnétique de la bobine et cette interaction entre les champs crée une variation d'impédance [1].

La pénétration du champ magnétique dans le matériau est caractérisé par l'équation suivante :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.6)$$

Où :

δ : La distance de pénétration (correspond à la distance à laquelle l'intensité du courant diminue de $1/e$).

f : La fréquence du champ magnétique.

μ : La perméabilité magnétique.

σ : La conductivité électrique.

En réarrangeant les termes, il est possible d'avoir l'intensité du signal en fonction de la distance dans le matériau :

$$I(x) = I_0 e^{-\frac{x}{\delta}} = I_0 e^{-x \sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.7)$$

Où :

$I(x)$: L'intensité du courant à une profondeur x .

I_0 : L'intensité du courant à une profondeur $x = 0$.

On remarque donc que l'intensité diminue très rapidement avec la distance et c'est cette grande diminution qui permet de mesurer de très petites distances, comme l'épaisseur de couches de peintures. Il est également intéressant de noter que bien que la perméabilité magnétique et la conductivité électrique sont des propriétés intrinsèques au matériau, la fréquence de modulation du champ magnétique pourrait être augmentée pour atteindre des résolutions encore plus grandes et ainsi détecter de plus petites imperfections. Cela aurait cependant pour coût de diminuer à quelle distance ces imperfections peuvent être détectées.

3 Méthodologie

3.1 Ultrasons

Afin de mesurer l'épaisseur des différentes pièces d'aluminium et de détecter la présence de cavités à l'intérieur de celles-ci, un transducteur ayant une fréquence de désexcitation d'environ 3.5 MHz a été utilisé. Ce dernier est placé sur la pièce en aluminium à mesurer et est contrôlé à l'aide d'un pulseur. Le signal est aussi transmis dans un oscilloscope, afin de mesurer la distance entre les échos. Un gel a également été placé entre le transducteur et la pièce à mesurer pour diminuer la différence d'indice de réfraction. En effet, sans ce gel, l'air entre le transducteur rendrait la transmission de l'onde sonore vers la pièce plus difficile et le signal mesuré serait de moins grande amplitude. Considérant que l'amplitude des échos est déjà très faible, il est primordial d'utiliser le gel.

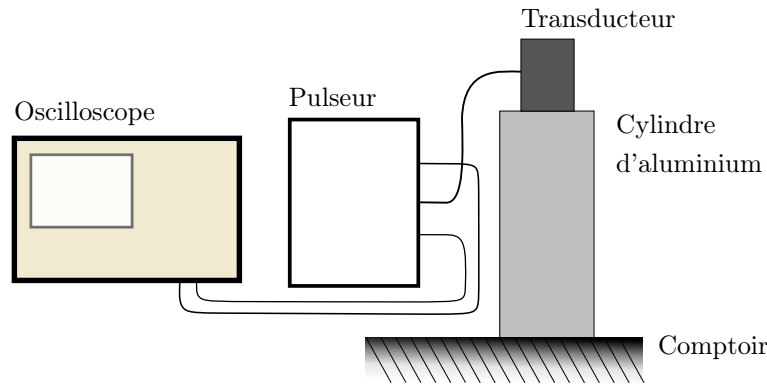


FIGURE 1 – Montage expérimental pour l'emploi des ultrasons dans la mesure d'une pièce d'aluminium.

Une fois le signal sonore envoyé dans la pièce, les distances (en temps) entre les maximums de chacun des échos sont mesurée à l'aide de la fonction *curseurs* de l'oscilloscope. Cette distance peut ensuite servir pour déterminer la distance parcourue par le son dans le matériel. En déplaçant le transducteur sur les pièces à mesurer, il était possible de déterminer l'emplacement de différentes cavités lorsque la distance entre les échos variait.

L'atténuation de l'onde sonore a été mesurée en utilisant un support conçu pour exercer une pression constante sur le transducteur pour s'assurer que la transmission de l'onde sonore est similaire d'une pièce à l'autre. Ensuite, l'amplitude maximale du premier écho est mesurée sur l'oscilloscope pour différentes tailles de cylindre et pour différents matériaux. Cette mesure permet de déterminer l'absorption de l'onde sonore dans le matériau.

3.2 Courants de Foucault

Pour mesurer l'épaisseur d'un matériau, deux bobines de fil de cuivre sont utilisées. En faisant osciller un courant dans chaque bobine à 10 kHz, il est possible de mesurer l'impédance de chaque bobine qui varie selon l'épaisseur de métal en dessous de celles-ci et selon la distance entre la bobine et le métal. À l'aide d'un oscilloscope, il est possible d'afficher la différence d'impédance entre les deux bobines.

La première étape de chaque mesure est d'équilibrer le pont de Wheatstone qui mesure la différence d'impédance des deux bobines. Un poids est ensuite placé sur une des deux bobines pour la maintenir en place. L'autre bobine peut ensuite être déplacée. Si l'impédance de la bobine d'exploration change, le point affiché sur l'oscilloscope se déplace et il est ainsi possible de déterminer que l'épaisseur du matériau est différente à cet endroit. Cette variation d'impédance peut ainsi indiquer la présence d'une faille ou d'une cavité.

Il est également possible d'étalonner la mesure de la différence d'impédance pour convertir cette variation en distance en μm . Il suffit de placer des couches minces de plastique en dessous de la bobine d'exploration et de noter la différence d'impédance entre les deux bobines. Il faut ensuite mesurer l'épaisseur de ces couches. Une courbe de calibration peut ensuite être tracée et utilisée pour convertir la variation d'impédance en distance réelle.

TABLE 1 – Mesure du temps d'écho selon le cylindre et son épaisseur mesurée

Signal à écho 1	Écho 1 à 2	Écho 2 à 3	Écho 3 à 4	Épaisseur mesurée
± 1.2	± 1.2	± 1.2	± 1.2	± 0.1
$[\mu s]$	$[\mu s]$	$[\mu s]$	$[\mu s]$	$[cm]$
24.00	23.6	-	-	7.5
16.0	16.0	15.6	15.8	5.0
8.3	7.8	7.8	7.8	2.5

TABLE 2 – Calcul du temps d'écho moyen et de son épaisseur calculée selon le cylindre et son épaisseur mesurée

Temps d'écho moyen	Épaisseur calculée	Épaisseur mesurée
$[\mu s]$	$[cm]$	$[cm]$
23.8 ± 0.3	7.5 ± 0.1	7.5 ± 0.1
15.85 ± 0.2	5.0 ± 0.1	5.0 ± 0.1
7.925 ± 0.3	2.5 ± 0.3	2.5 ± 0.1

Vitesse du son dans l'aluminium : $v_{alu} = 6300 \text{ m/s}$

4 Résultats et Analyse

4.1 Ultrasons

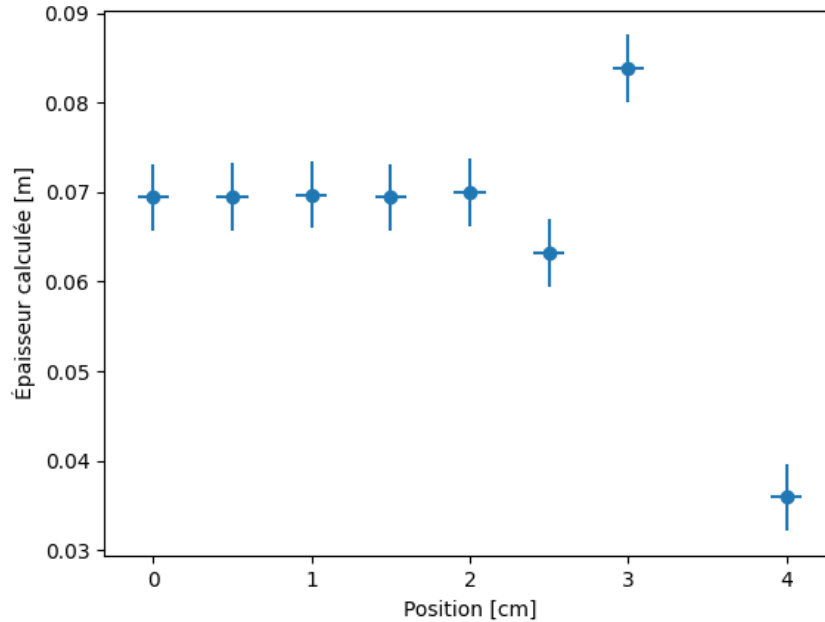
Ici sont présentés les résultats et l'analyse relatifs au contrôle par ultrasons.

4.1.1 Mesure d'une épaisseur

Trois cylindres d'aluminium de hauteurs variables ont été mesurés par contrôle aux ultrasons. Les temps d'échos mesurés correspondent au temps d'écho moyen entre chaque écho visible à l'oscilloscope. Un gel est placé entre la sonde et le cylindre pour minimiser les réflexions au premier interface. Comme la vitesse du son dans l'aluminium est connue, il est possible de mesurer la distance parcourue par les ultrasons et ainsi inférer l'épaisseur du cylindre. Le tableau 1 présente les valeurs mesurées et le tableau 2 présente les valeurs calculées. Les incertitudes sur les valeurs sont calculées à l'aide de la méthode de propagation d'incertitude ainsi que de l'erreur sur la moyenne. Un exemple de calcul pour le temps d'écho moyen suivi de l'épaisseur calculée est présent à l'annexe A.

4.1.2 Réflexion sur une surface courbée

La pièce d'aluminium avec une surface courbe a été sondée par ultrasons. La figure 2 présente les valeurs d'épaisseurs calculées. Les calculs sont les mêmes qu'à la section précédente. À noter qu'à partir de 3 cm, il était considérablement plus difficile de prendre une lecture sur l'oscilloscope. Lorsqu'on tente de mesurer une épaisseur lorsque les 2 surfaces ne sont pas parallèles, la mesure est très précise puisque les ultrasons ne sont pas réfléchis perpendiculairement, on les mesure donc après plusieurs réflexions.

FIGURE 2 – Hauteur de la pièce d'aluminium selon la position en x sur celle-ci

4.1.3 Détection d'une cavité

En sondant la pièce d'aluminium contenant une cavité, 2 mesures d'épaisseur ont été trouvées, toujours avec la même méthode que précédemment. Dans le cas où il n'y a pas de cavité, la pièce a une épaisseur de $(0.0406 \pm 0.0004)\text{m}$ et lorsqu'il y en a une, $(0.0214 \pm 0.0007)\text{m}$. La figure 3 présente la forme de la cavité de manière très approximative. Pour chaque position, 3 valeurs sont mesurées et on calcule la moyenne, lorsque possible. L'incertitude sur la position de la cavité est estimée selon le nombre de mesures prises. Celle-ci est centrée et symétrique, les mesures sont donc identifiées pour un seul des côtés.

4.1.4 Coefficient d'atténuation

Pour la mesure de la constante d'atténuation, il est nécessaire d'utiliser le support équipé d'un ressort pour appliquer une pression constante à chaque mesure. L'incertitude sur l'amplitude est approximée selon les divisions sur l'oscilloscope puisque les mesures étaient prises à l'oeil. La table 3 présente les mesures de la constante d'atténuation pour les cylindres d'acrylique et la table 4 présente celles pour l'aluminium. Un exemple de calcul est fourni à l'annexe B.

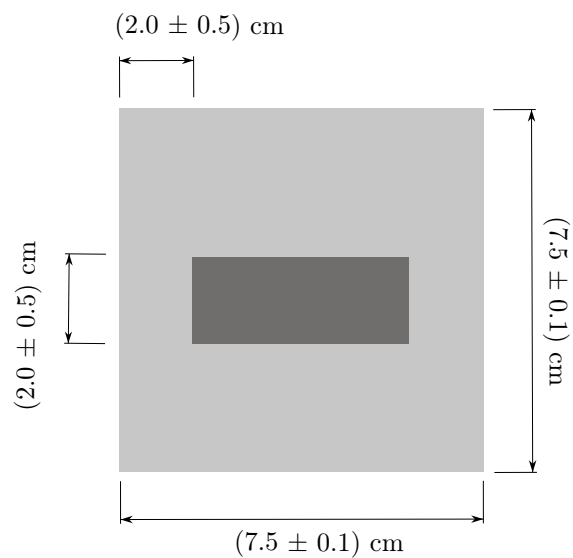


FIGURE 3 – Schéma de la forme de la cavité dans la pièce d'aluminium identifiée avec la sonde à ultrasons (pas à l'échelle)

TABLE 3 – Constante d'atténuation de l'acrylique

Épaisseur ± 0.1 [cm]	Amplitude initiale ± 0.5 [V]	Amplitude réfléchie [V]	Constante d'atténuation [dB/m]
2.5	84.8	1.72 ± 0.05	1360 ± 70
5.0	86.4	0.164 ± 0.005	1090 ± 40
7.5	86.4	0.0352 ± 0.0005	910 ± 20

Valeur moyenne : $\overline{\alpha_{acr}} = 1200 \pm 200 \text{ dB/m}$

TABLE 4 – Constante d'atténuation de l'aluminium

Épaisseur ± 0.1 [cm]	Amplitude initiale ± 0.5 [V]	Amplitude réfléchie ± 0.3 [V]	Constante d'atténuation [dB/m]
2.5	85.6	11.2	710 ± 40
5.0	85.6	10.8	360 ± 20
7.5	85.6	10.2	246 ± 8

Valeur moyenne : $\overline{\alpha_{alu}} = 500 \pm 300 \text{ dB/m}$

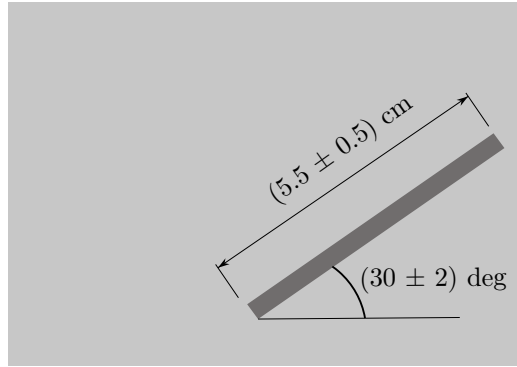


FIGURE 4 – Schéma de la taille et angle de la fissure dans la plaque d'aluminium identifiée avec la le contrôle par courants induits (pas à l'échelle)

4.2 Courants de Foucault

4.2.1 Détection d'une fissure

La fissure a été positionnée en observant les changements d'impédances de la sonde. Sa taille et son orientation sont illustrées à la figure 4. L'incertitude est estimée selon le nombre de mesures prises avec la sonde.

4.2.2 Mesure de l'épaisseur d'un revêtement

Pour mesurer l'épaisseur d'un revêtement à l'aide des mesures, il est d'abord nécessaire d'étalonner l'appareil. Pour le laboratoire, seul la composante résistive (en x) sera utilisée pour mesurer l'épaisseur des revêtements. La figure 5 présente l'étalonnage obtenu avec des feuilles de plastiques transparentes. L'incertitude sur l'épaisseur correspond à la plus petite division du micromètre, et celle sur la tension est de 0.03V puisqu'une estimation visuelle est faite pour mesurer la valeur.

Il est maintenant possible de directement calculer l'épaisseur des différents revêtements selon la tension en x . 4 revêtements d'épaisseurs différentes ont été identifiés. Les mesures ont été illustrées à la figure 6. Les incertitudes ne sont pas affichées pour faciliter la lecture, mais dans le cas de la position, elle est de 0.05 cm.

On peut estimer l'incertitude sur les mesures de revêtement à 0.3 mm en observant la distribution des données sur la figure.

5 Discussion

5.1 Ultrasons

Le premier objectif du laboratoire était de mesurer l'épaisseur de 3 cylindres d'aluminium à l'aide d'ultrasons. Les valeurs calculées avec cette méthode concordent avec les données mesurées à l'aide

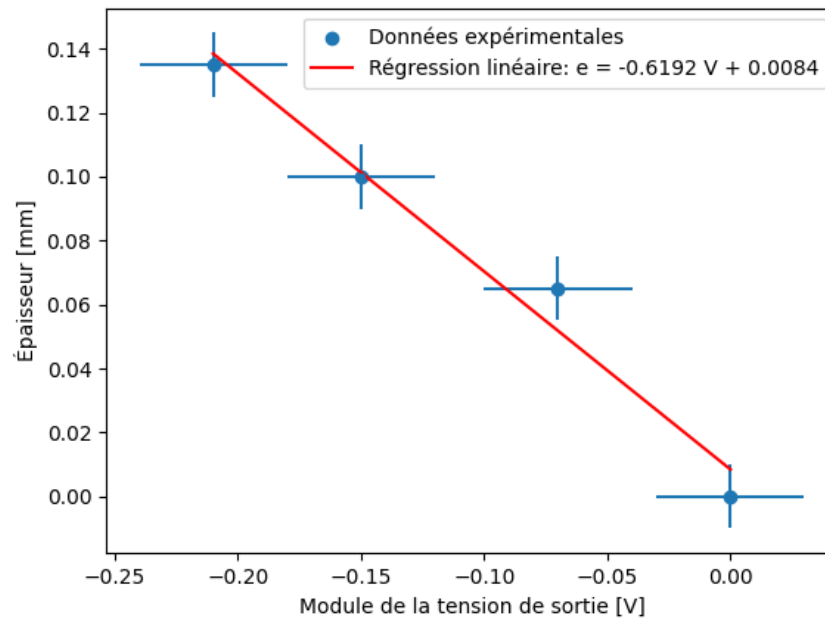


FIGURE 5 – Étalonnage du signal de deux sondes à courants de Foucault en fonction de l'épaisseur d'une couche non conductrice

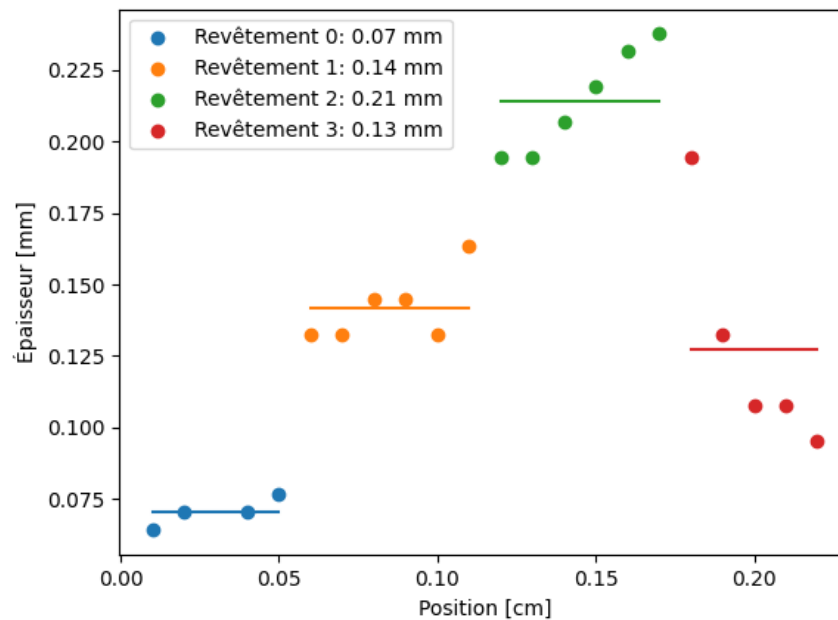


FIGURE 6 – Épaisseurs des revêtements calculés avec l'étalonnage de la figure 5 selon la position en x de la sonde

d'une règle, tel que présenté au tableau 2. Dans tous les cas, les deux mesures sont dans l'intervalle d'incertitude. Cela montre très bien la précision des ultrasons pour mesurer l'épaisseur d'un matériel, tant que les deux surfaces utilisées pour l'émission et la réflexion des ultrasons sont planes, tel qu'on verra plus tard. Il serait toute fois intéressant d'utiliser une meilleure méthode pour mesurer le temps d'un écho autre que simplement une mesure directe sur l'oscilloscope, car l'incertitude de celle-ci est relativement élevée, surtout puisque le signal est assez bruité. La plus petite mesure qui peut être fait avec cette méthode est celle qui correspond à la distance parcourue dans le matériau durant la déxcitation du transducteur.

Par contre, lorsqu'on arrive à la mesure de l'épaisseur lorsqu'il y a réflexion sur une surface courbée, il est possible d'observer que la mesure est très peu précise et beaucoup plus difficile. Lorsque la pièce est encore plane des deux côtés, soit de 0 à 2 cm, on peut voir sur la figure 2 que les mesures sont très stables, mais qu'elles sont vite détériorées dans la partie courbée. Cela est causé par le fait que la surface courbée fait réfléchir les ultrasons dans une direction perpendiculaire à la courbure, les ultrasons réfléchis doivent donc faire plusieurs réflexions pour revenir au même endroit. Un bon exemple de ce phénomène est la mesure à 3 cm. On obtient une épaisseur de 0.084 ± 0.008 m alors que le point le plus épais de la pièce est théoriquement de 0.070 ± 0.008 . Il est possible que l'onde fasse 3 réflexions au lieu de 2. Si on calcule l'épaisseur avec 3 réflexions, on obtient 0.056 ± 0.008 m, ce qui suivrait beaucoup mieux la tendance.

Pour la détection de la cavité, notre méthode permet de facilement identifier sa présence, mais pas nécessairement de bien la positionner, puisque l'expérience est faite à la main et non avec un dispositif pour placer précisément la sonde. Le diamètre du transducteur limite aussi fortement la résolution des mesures. Il a tout de même été possible d'estimer l'aire occupée par la cavité sans savoir sa forme exacte.

Le dernier objectif de cette section était de mesurer la constante d'atténuation dans un matériau tel que l'acrylique et l'aluminium. Les mesures sont très peu précises, surtout dans le cas de l'aluminium. En priori, on aurait cru que la constante d'atténuation de l'aluminium est faible mais l'expérience semble montrer qu'elle est très élevée. Par contre, on peut voir qu'elle varie très peu avec la profondeur. Il se peut donc qu'il y ait une perte d'amplitude au premier interface, soit entre la sonde et le cylindre. Pour ce qui est de l'acrylique, les mesures semblent déjà mieux concordées, mais la grande variation entre les temps d'échos donnent une incertitude particulièrement élevée (mais tout de même considérablement plus faible que dans le cas de l'aluminium).

5.2 Courants de Foucault

Le premier objectif de cette section était d'identifier la taille et l'orientation d'une fissure dans un bloc d'aluminium. Il a été facile de remarquer la présence d'une fissure, mais comme avec les ultrasons, la méthode utilisée pour placer la sonde rend l'expérience très peu précise.

Pour ce qui est de la mesure des revêtements, nos mesures sont considérablement plus précises. On peut par contre voir qu'il y a une certaine variation pour les mêmes revêtements. 4 revêtements différents ont été identifiés. Il aurait été intéressant de prendre une plus grande quantité de mesures pour faire une analyse statistique de nos données et avoir une plus grande résolution. De plus, une méthode pour mieux mesurer l'emplacement de la sonde aurait encore une fois été utile.

6 Conclusion

Dans cette expérimentation, il a été possible adéquatement mesurer la taille des 3 cylindres d'aluminium en utilisant les ultrasons. Les mesures obtenues sont très fiables et correspondent aux tailles réelles des cylindres. Les ultrasons ont également servis à détecter l'emplacement et la taille approximative d'une cavité dans un bloc d'aluminium. La mesure du coefficient d'absorption n'a malheureusement pas pu être adéquatement mesurée, mais il est quand même possible de voir que l'acrylique absorbe nettement plus les ondes sonores que l'aluminium.

À l'aide des courants de Foucault, il a été possible de trouver une autre cavité dans un second bloc d'aluminium, ainsi que de la mesurer approximativement. Les courants de Foucault ont également permis de mesurer de façon très précise l'épaisseur de différentes couches de peintures sur un morceau de métal.

Il pourrait être intéressant de pousser plus loin les expérimentations en faisant varier la fréquence de modulation des courants de Foucault pour aller chercher une plus grande résolution ou pour tenter de détecter des imperfections à de plus grandes profondeurs. Il serait également intéressant de tenter d'utiliser les ultrasons avec un angle d'incidence différent de 90° , afin de mesurer de limiter l'effet des surfaces courbes sur la mesure de la taille d'une pièce.

Références

- [1] A SOPHIAN et al. "Electromagnetic and eddy current NDT : a review". en. In : 43.5 (2001).
- [2] Martijn VERCAMMEN. "The reflected sound field by curved surfaces". In : 123 (juin 2008), p. 3442.

A Mesure d'une épaisseur par ultrasons

A.1 Calcul du temps d'écho moyen

Cylindre 1 : $h = 7.5 \text{ cm}$

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{24.0 \mu\text{s} + 23.6 \mu\text{s}}{2} = 23.8 \mu\text{s}$$

$$\Delta \bar{t} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \approx 0.3 \mu\text{s}$$

A.2 Calcul de la distance parcourue : Cylindre 1

Cylindre 1 : $h = 7.5 \text{ cm}$

On divise le temps moyen par 2 puisque les ultrasons font un aller-retour. L'incertitude sur une valeur de référence est nulle si non-fournie.

$$d_{cal} = \frac{v_{alu} \cdot \bar{t}}{2} = \frac{6300 \cdot 23.8}{2} = 7.497 \text{ cm}$$

$$\Delta d_{cal} = d_{cal} \sqrt{\left(\frac{\Delta \bar{t}}{\bar{t}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v_{alu}}{v_{alu}}\right)^2} = 7.497 \sqrt{\left(\frac{0.3}{23.8}\right)^2 + \left(\frac{0}{6300}\right)^2} \approx 0.1 \text{ cm}$$

B Mesure du coefficient d'atténuation

Cylindre 1 : $h = 7.5 \text{ cm}$

$$\alpha[\text{dB/m}] = -\frac{1}{d} 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} = -\frac{1}{0.075} 20 \log_{10} \frac{0.0352}{86.4} = 904.5 \text{ dB/m}$$

$$\Delta \alpha = \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_0}{P_0}\right)^2} = 904.5 \sqrt{\left(\frac{0.1}{7.5}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{86.4}\right)^2 + \left(\frac{0.0005}{0.0352}\right)^2} \approx 20 \text{ dB/m}$$