

CFA/VISHNO 2016

Déconvolution d'échos ultrasonores régulièrement espacés pour la mesure d'épaisseur de structures fines

S. Bourguignon^a, E. Carcreff^b, N. Lurin^c et S. Moreau^c

^aIRCCyN, Ecole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France

^bThe Phased Array Company, 9 rue du marché commun, 44300 Nantes, France

^cEcole Centrale de Nantes, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes, France

sebastien.bourguignon@irccyn.ec-nantes.fr



LE MANS

Ce travail présente une méthode pour l'estimation de l'épaisseur de structures fines à partir de signaux ultrasonores. L'envoi d'une impulsion ultrasonore, en incidence normale, dans un matériau supposé homogène, provoque la réception, par le transducteur utilisé en émission / réception, d'un ensemble d'échos régulièrement espacés. L'estimation du décalage entre deux échos successifs permet alors de remonter à l'épaisseur du matériau inspecté. Lors de l'inspection de structures fines (revêtements, tuyauteries de circuits de centrales électriques ou de pipelines), les échos peuvent se chevaucher et une déconvolution du signal reçu est alors nécessaire. Cette contribution aborde la déconvolution en prenant explicitement en compte un modèle d'impulsions régulièrement espacées, dont les amplitudes décroissent géométriquement. L'estimation est alors envisagée *via* la minimisation d'un critère des moindres carrés non linéaires. Dans le cas où la réponse impulsionnelle du transducteur (donnant la forme de chaque écho) a été préalablement identifiée, le problème revient à minimiser une fonctionnelle dépendant uniquement d'un paramètre d'espacement et de deux paramètres gérant la décroissance des amplitudes. Nous abordons le cas où la réponse impulsionnelle est inconnue (déconvolution aveugle), qui formule un problème d'optimisation plus complexe. Une solution algorithmique est également proposée, visant à estimer conjointement la réponse impulsionnelle (paramétrée sous forme gaussienne) et les paramètres du milieu inspecté. La méthode est validée sur des simulations et une application est présentée pour la mesure d'épaisseur de plaques métalliques fines (1, 2 et 4 millimètres).

1 Introduction

La problématique de la mesure d'épaisseur de pièces ou de milieux qui ne sont accessibles que d'un côté est rencontrée dans de nombreux domaines applicatifs. Citons par exemple la mesure d'épaisseur de revêtements dans le domaine de la fabrication industrielle (automobile, aéronautique) ou de la peinture, ou encore le contrôle de l'épaisseur de tuyauteries soumises à des conditions contraignantes, comme les circuits d'alimentation en eau des centrales électriques [1] ou les conduites de pipelines [2].

L'utilisation de dispositifs ultrasonores est une modalité couramment utilisée dans ce contexte [3]. La mesure reposant sur l'évaluation du temps de vol entre les échos réfléchis, une limitation claire des méthodes ultrasonores dans ce contexte réside dans la nécessité d'une épaisseur suffisante du matériau inspecté, afin que les différents échos soient séparés temporellement dans le signal reçu, permettant une détection très simple du temps de vol [3], et donc de remonter à l'information d'épaisseur. Dans le cas où l'épaisseur est plus fine, les différents échos réfléchis se chevauchent et une simple inspection visuelle, voire une méthode basique d'estimation du temps de vol, peuvent s'avérer inefficaces. Cependant, le signal reçu résultant de la superposition de réflexions multiples d'une même forme d'onde, la prise en compte d'un modèle de signal approprié doit permettre, dans une certaine mesure, de remonter à l'estimation du temps (constant) séparant les différents échos.

Cette communication propose d'étudier l'estimation de temps de vol dans ce contexte, en décrivant les données reçues comme la superposition d'échos régulièrement espacés et d'amplitudes associées prédites par un modèle de réflexions multiples entre deux matériaux. Afin de s'affranchir d'une étape de calibrage possiblement complexe à mettre en œuvre en pratique, nous envisageons également l'estimation, conjointement aux temps de vol, de la forme de l'écho (*i.e.*, la réponse impulsionnelle du système ultrasonore), représentée par une forme d'onde gaussienne modulée en amplitude, de paramètres inconnus. L'ensemble des paramètres est alors estimé *via* l'optimisation d'un critère des moindres carrés non linéaires, dont nous étudions l'allure et pour lequel une stratégie de calcul est proposée. Des résultats satisfaisants sont obtenus sur des données simulées, ainsi qu'en application à la mesure d'épaisseur de

plaques fines d'aluminium à partir de mesures acquises en laboratoire.

2 Modèle de signal et critère des moindres carrés

Considérons un dispositif de mesure semblable au schéma de la Figure 1 : un matériau homogène d'épaisseur d inconnue (milieu 2) est immergé dans un milieu 1. À une distance D de l'interface entre les deux milieux, se trouve un transducteur ultrasonore, qui émet et reçoit le signal en incidence normale par rapport à l'interface.

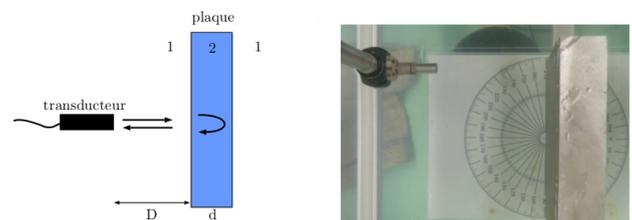


FIGURE 1 – Principe de mesure d'épaisseur par un dispositif ultrasonore en réflexion. Schéma et photo du dispositif de mesure pour une plaque immergée.

Le signal reçu en réflexion peut se décrire comme la superposition d'une infinité de réflexions multiples [4] :

$$y(t) \approx \alpha_{12}h(t - t_0) + \beta_{12}\beta_{21} \sum_{k=1}^{+\infty} \alpha_{21}^{2k-1}h(t - t_0 - kT),$$

où :

- $h(t)$ représente la réponse du système de mesure excité sous forme impulsionnelle ;
- t_0 est le temps de vol aller et retour associé au premier écho, correspondant au temps de propagation entre le transducteur et l'interface : $t_0 = 2D/c_1$, avec c_1 la vitesse du son dans le milieu 1 ;
- T représente le temps de vol d'un aller et retour dans le milieu 2 : $t_2 = 2d/c_2$, avec c_2 la vitesse du son dans le milieu 2 ;

- α_{ij} et β_{ij} sont, respectivement, les coefficients de réflexion et de transmission entre le milieu i et le milieu j , définis par [3] :

$$\alpha_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_i + Z_j}, \beta_{ij} = \frac{2Z_j}{Z_i + Z_j}$$

où Z_i représente l'impédance acoustique du milieu i . Puisqu'on a alors $\alpha_{ij} = -\alpha_{ji}$ et $\beta_{ij} = 1 + \alpha_{ij}$, le modèle précédent peut encore s'écrire, en notant $\alpha = \alpha_{12}$:

$$y(t) \approx \alpha h(t - t_0) - (1 - \alpha^2) \sum_{k=1}^{+\infty} \alpha^{2k-1} h(t - t_0 - kT).$$

Dans la suite, nous notons $y_n = y(nT_e)$, $n = 1, \dots, N$ les N valeurs du signal échantillonné à la période T_e . Le signal reçu étant de durée finie, il est également cohérent de ne considérer qu'une somme finie d'échos, en tronquant le nombre d'échos reçus à une valeur prédéfinie K .

3 Problème à forme d'écho connue

Considérons tout d'abord la réponse impulsionnelle $h(t)$ connue et le problème d'estimation des paramètres $\theta = [\alpha, t_0, T]$ au sens des moindres carrés :

$$\theta = \arg \min_{\theta} J(\theta), J(\theta) = \sum_n (y_n - \mathcal{M}(\theta, h, nT_e))^2 \quad (1)$$

avec

$$\mathcal{M}(\theta, h, t) = \alpha h(t - t_0) - (1 - \alpha^2) \sum_{k=1}^K \alpha^{2k-1} h(t - t_0 - kT). \quad (2)$$

C'est un problème de moindres carrés non linéaires, pouvant être abordé par différentes approches algorithmiques [5, Chapitre 20]. Sa non-linéarité en certains paramètres, en revanche, rend son optimisation délicate, la plupart des méthodes existantes ne garantissant, au mieux, que l'obtention d'un minimum local.

Si la dépendance du critère en α est plutôt simple, sa dépendance en T (qui est l'inconnue d'intérêt) et t_0 est bien plus critique. En effet, la nature oscillante de la forme d'onde $h(t)$ génère des modèles proches lorsque T et t_0 sont décalés d'une pseudo-période. La Figure 2 a)-e) montre ainsi, pour un problème simulé et sans bruit, l'allure du critère J en fonction de chacune des variables de θ , les autres étant fixées à leurs vraies valeurs.

Le résultat de l'optimisation risque donc d'être très sensible aux valeurs initiales choisies pour T . Puisque t_0 correspond au temps de vol dans le milieu 1 et ne dépend que de la distance du transducteur à l'interface entre les deux milieux, il est naturel de le supposer connu, ou d'en fournir une estimation initiale cohérente avec le dispositif de mesure. Le problème est plus délicat pour T ($t_0 = 2d/c_2$), l'épaisseur d étant l'inconnue principale du problème.

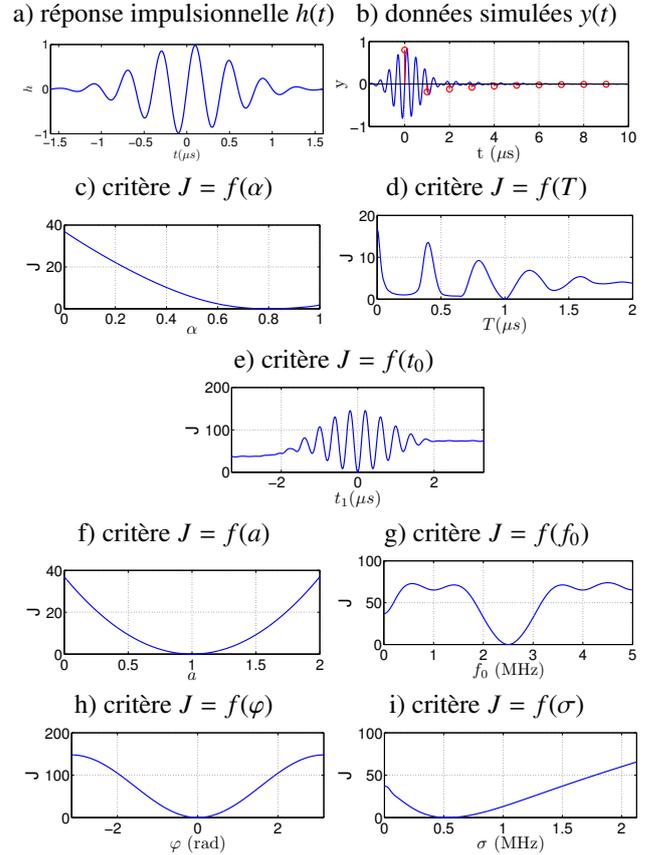


FIGURE 2 – Problème simulé et allure du critère des moindres carrés en fonction des différentes variables. a) : forme d'onde gaussienne modulée. b) : jeu de données simulé (ligne continue) et positions et amplitudes des échos associés (cercles). c)-e) : critère J en fonction des paramètres du milieu (α , T et t_0). f)-i) : critère J en fonction des paramètres de la forme d'onde (a , f_0 , φ , σ). Dans ces représentations à une dimension, les autres paramètres sont fixés à leurs vraies valeurs.

4 Problème à forme d'écho inconnue

La connaissance de la réponse du transducteur $h(t)$ est un point critique du problème faisant l'objet de ce papier. D'une part, l'estimation directe de $h(t)$ à partir du signal reçu est intrinsèquement liée à une nette séparation des échos dans ce signal – cas pour lequel aucune méthode avancée d'estimation de temps de vol n'est alors requise ! D'autre part, le recours à une étape de calibrage de la réponse à partir de mesures dans un environnement plus favorable peut s'avérer particulièrement pénalisant sur le plan pratique, et pose le problème de la reproductibilité du modèle.

Nous envisageons donc ici le problème d'estimation conjointe des paramètres θ de la section précédente et de la réponse impulsionnelle, que nous modélisons sous une forme analytique paramétrée à temps continu. Dans la mesure où le modèle est suffisamment bien adapté, ce choix nous permet en particulier d'aborder l'estimation des temps de vol *de manière continue*, permettant une précision non contrainte par la grille d'échantillonnage, mais surtout l'utilisation de méthodes d'optimisation continue.

Nous choisissons donc classiquement [6] un modèle

gaussien :

$$h(\theta_h, t) = a \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

où les paramètres $\theta_h = [a, f_0, \varphi, \sigma^2]$ sont inconnus. L'estimation conjointe des paramètres du milieu inspecté et des paramètres instrumentaux est alors abordée sous la forme du problème d'optimisation :

$$\begin{aligned} [\hat{\theta}, \hat{\theta}_h] &= \arg \min_{\theta, \theta_h} J(\theta, \theta_h), \\ J(\theta, \theta_h) &= \sum_n (y_n - \mathcal{M}(\theta, h(\theta_h, t_n)))^2. \end{aligned}$$

Notons que si le modèle (3) est linéaire en a , il ne l'est pas en les autres paramètres de θ_h . Cependant, la dépendance du critère en ceux-ci reste plutôt régulière, comme le montre la Figure 2 f)-i).

Dans ce travail, l'optimisation est réalisée *via* le solveur standard de Matlab, mettant en œuvre un algorithme de régions de confiance.

Initialisations et domaines de recherche

Afin d'améliorer l'efficacité de l'estimation, aussi bien sur le plan de la solution obtenue que de son coût de calcul, nous proposons différentes stratégies d'initialisation et des contraintes spécifiques pour chacun des paramètres à estimer.

Paramètres instrumentaux

- L'amplitude a de la réponse impulsionnelle intervenant linéairement dans le modèle, le critère J est convexe en a . L'initialisation en a n'est donc pas un point critique. Dans la suite, nous l'initialisons à 1 et imposons $a \geq 0$ afin d'éviter des ambiguïtés de modèle (a, φ) \leftrightarrow ($-a, \varphi + \pi$).
- Le paramètre f_0 correspond à la fréquence centrale du transducteur ; dans une démarche "aveugle", nous proposons de l'initialiser à la fréquence maximisant la transformée de Fourier (en module) des données.
- Le paramètre σ , réglant la largeur de l'impulsion émise, peut être relié au facteur de bande passante (BWR, band width ratio) du transducteur, sous la forme approchée [7] :

$$\sigma^2 \simeq \frac{1}{\pi^2} \frac{2 \ln \sqrt{2}}{\text{BWR} f_0}.$$

Par conséquent, σ est initialisé en fixant $\text{BWR} = 0.5$ et nous imposons $\sigma > 0$.

- La phase φ est initialisée à 0. Notons que le critère J est 2π -périodique en φ , mais il n'est pas souhaitable de contraindre la phase dans $[0, 2\pi[$: une estimation de φ modulo 2π donne le même modèle, et borner la phase dans un intervalle augmente le risque que l'optimisation vienne "buter" sur un bord de cet intervalle.

Paramètres du milieu

- Le paramètre α est contraint à l'intervalle $[0, 1]$, et initialisé à 0.5.
- Afin de limiter les modes locaux dus aux fortes oscillations du critère en T , nous restreignons son intervalle de recherche à $\mathcal{I}_T = [3T_{\text{ini}}/4, 5T_{\text{ini}}/4]$, où T_{ini} est une valeur de référence *a priori* connue sur T . Ensuite, l'optimisation est lancée successivement pour dix valeurs initiales de T régulièrement espacées sur \mathcal{I}_T .
- Le temps d'arrivée du premier écho t_0 est initialisé à T_{max} , où T_{max} est l'instant du maximum de l'enveloppe du signal et nous imposons $t_0 \geq 0$.

5 Résultats de simulation

Nous considérons ici un problème simulé, où $h(t)$ est générée selon le modèle (3), avec $a = 1$, $f_0 = 2.5$ MHz, $\varphi = 0$ et $\sigma = 0.53 \mu\text{s}$. Son allure est représentée en Figure 2 a). Le coefficient de réflexion entre les deux milieux vaut $\alpha = 0.8$ et deux configurations sont envisagées : $T = 2\mu\text{s}$, produisant des échos relativement bien séparés et $T = 1\mu\text{s}$, produisant un plus fort chevauchement des échos. On considère ici l'origine des temps au temps d'arrivée du premier écho, soit $t_0 = 0$. Les données sont échantillonnées à $F_e = 100$ MHz. La Figure 3 (en haut) présente deux jeux de données types correspondants, générés avec un rapport signal sur bruit de 20 dB.

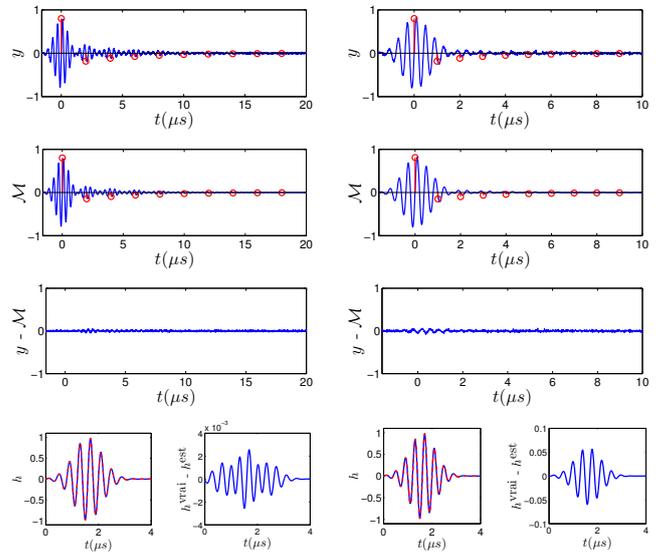


FIGURE 3 – En haut, données simulées pour $T = 2\mu\text{s}$ (à gauche) et $T = 1\mu\text{s}$ (à droite). Deuxième ligne : résultats de la procédure d'estimation. Les données et le modèle estimé sont en trait plein bleu et les séquence d'impulsions associées sont représentées par les cercles rouges. Troisième ligne : erreur de modélisation. Quatrième ligne : réponse estimée \hat{h} et erreur d'estimation $h - \hat{h}$.

La Figure 3 reproduit un exemple typique de résultat obtenu et le Tableau 1 présente les résultats d'estimation de l'ensemble des paramètres, moyennés sur 50 réalisations aléatoires du bruit. L'estimation de l'ensemble des paramètres est très précise, avec logiquement une légère

Paramètre simulé	Estimation ($T = 2\mu s$)	Estimation ($T = 1\mu s$)
$a = 1$	1 ± 0.004	0.997 ± 0.01
$f_0 = 2.5 \text{ MHz}$	2.5 ± 0.0008	2.5 ± 0.001
$\sigma = 0.531 \mu s$	0.532 ± 0.002	0.532 ± 0.003
$\varphi = 0$	0.005 ± 0.02	0.01 ± 0.04
$\alpha = 0.8$	0.8 ± 0.003	0.802 ± 0.006
$T = 2 \mu s$	2 ± 0.0002	
$T = 1 \mu s$		1 ± 0.0006
$t_0 = 0 \mu s$	0 ± 0.0003	0.001 ± 0.002

TABLEAU 1 – Résultats de simulation : moyenne \pm écart-type de chaque paramètre estimé, sur 50 réalisations aléatoires du bruit.

dégradation des résultats lorsque l'on passe du cas $T = 2 \mu s$ au cas $T = 1 \mu s$, dans lequel les échos sont plus mélangés. Notons que cette qualité de résultat est à mettre en regard d'un coût calculatoire assez élevé, de l'ordre de 6 s pour $T = 2\mu s$ et 12 s pour $T = 1\mu s$. Ce coût est dû à la nécessaire procédure d'initialisation en 10 points différents de l'intervalle de variation T , laquelle permet de ne pas converger vers un minimum local insatisfaisant.

6 Application : épaisseur d'une plaque d'aluminium

Nous appliquons finalement la méthode proposée à des mesures acquises au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine [7]. Il s'agit de mesures en réflexion issues de réflexions multiples dans des plaques d'aluminium immergées dans l'eau (voir le dispositif en Figure 1). Les plaques mesurent environ $d_1 = 4 \text{ mm}$, $d_2 = 2 \text{ mm}$ et $d_3 = 1 \text{ mm}$ et la fréquence centrale du transducteur est de 2.25 MHz. Les données sont représentées en Figure 4 (en haut).

Le nombre d'échos recherchés est fixé à $K = 10$. La Figure 4 montre les résultats obtenus. Pour chaque cas, le train d'ondes estimé modélise assez fidèlement les données, en particulier en ce qui concerne la fréquence d'oscillation et la période de répétition des échos. Nous remarquons cependant une différence non négligeable sur la forme estimée par rapport à la réalité, essentiellement due au caractère non gaussien de l'écho réel. Cet écart permet toutefois d'estimer correctement l'épaisseur : en considérant la vitesse du son dans l'aluminium égale à $c_2 = 6380 \text{ m.s}^{-1}$, nous obtenons $d_1 \approx 3.96 \text{ mm}$, $d_2 \approx 1.99 \text{ mm}$ et $d_3 \approx 1.02 \text{ mm}$.

7 Discussion

Nous avons étudié l'estimation de l'épaisseur d'une couche fine d'un milieu homogène à partir de mesures ultrasonores en réflexion, dans le cas où les échos émis à chaque réflexion se chevauchent. La prise en compte d'un modèle de signal très contraint, aussi bien sur les temps de vol des échos que sur les amplitudes associées, rend possible l'estimation conjointe des paramètres du milieu – en particulier son épaisseur – et de la forme des échos, paramétrée par une oscillation sinusoïdale dans une enveloppe gaussienne. L'optimisation du critère des

moindres carrés non linéaires associé au problème est rendue difficile par la dépendance du critère en le principal paramètre d'intérêt, l'espacement entre les échos reçus. La présence de minima locaux critiques pénalise l'efficacité de l'optimisation et impose, d'une part, une recherche locale autour d'une valeur prédéfinie, et d'autre part une stratégie d'optimisation basée sur plusieurs initialisations successives. Notons toutefois que cette étape pourrait être efficacement parallélisée.

Dans cette communication, l'optimisation est réalisée avec les fonctions génériques d'optimisation proposées sous Matlab. Le temps de calcul sur les données réelles est de l'ordre de la dizaine de secondes, ce qui reste trop coûteux pour envisager un traitement temps réel. Cependant, la mise en place d'un algorithme d'optimisation spécifique à ce problème devrait permettre d'en réduire le coût calculatoire.

Remerciements

L'essentiel de ce travail a été réalisé dans le cadre de projets d'élèves-ingénieurs de l'option SIGMA de l'École Centrale de Nantes : Nathalie Lurin et Solène Moreau, Chunze Lin et Jiafan Peng. Nous remercions également Aroune Duclos du Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine pour l'ensemble des mesures réalisées et son accueil au LAUM.

Références

- [1] M. S. O'Brien, A. N. Sinclair, and S. M. Kramer. Recovery of a sparse spike time series by ℓ_1 norm deconvolution. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(12), Déc. 1994.
- [2] J. A. de Raad and F. H. D. Dijkstra. Mechanised UT on girth welds during pipeline construction : A mature alternative to radiography. *Insight*, Juin 1998.
- [3] J. Krautkramer and H. Krautkramer. *Ultrasonic Testing of materials*. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [4] J. Saniie and D.T. Nagle. Pattern recognition in the ultrasonic imaging of reverberant multilayered structures. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 36(1), 1989.
- [5] P. M. Pardalos and M. G. C. Resende. *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University Press, 2002.
- [6] R. Demirli and J. Saniie. Model-based estimation of ultrasonic echoes. part i : Analysis and algorithms. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 48(3), Mai 2001.
- [7] E. Carreff. *Déconvolution adaptative pour le contrôle non destructif par ultrasons*. Thèse de doctorat, Université du Maine, Novembre 2014.

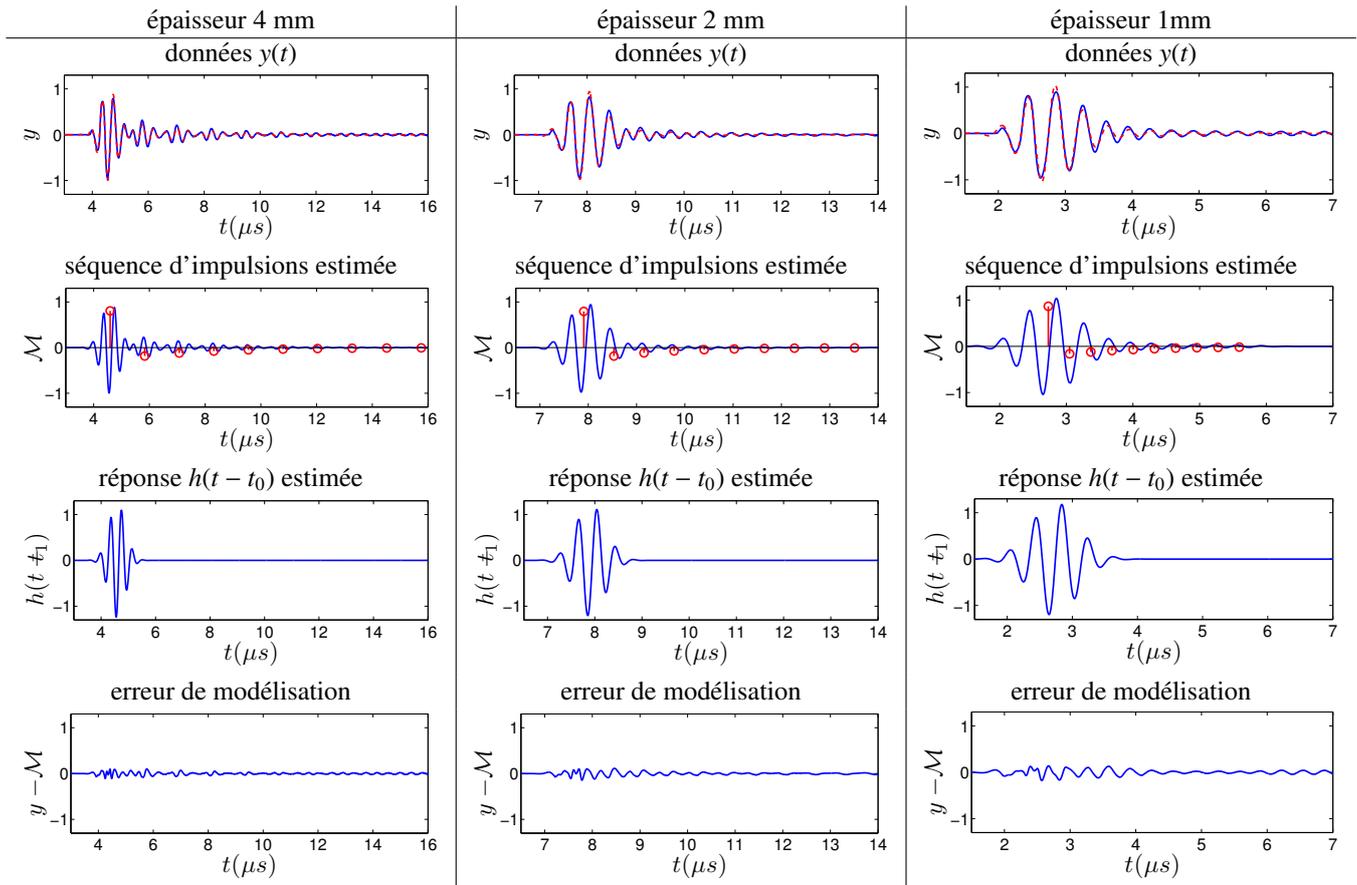


FIGURE 4 – Application à la mesure de l'épaisseur de plaques d'aluminium d'environ 4 mm (gauche), 2mm (centre) et 1mm (droite). En haut : données mesurées (trait plein bleu) et modèle estimé (ligne discontinue rouge). Deuxième ligne : séquence d'impulsions estimée (cercles rouges) correspondant aux échos (localisation et coefficient de réflexion) et modèle estimé.

Troisième ligne : forme d'onde estimée, centrée en t_0 estimé (premier écho). En bas : erreur de modélisation.