
Caractérisation par ondelettes de cibles immergées dans un liquide

Application à la mesure dimensionnelle ultrasonore

Angel Scipioni* — Pascal Rischette***

* *Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications, (LPMIA – UMR CNRS 7040), Nancy Université, BP239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex
angel.scipioni@iut-longwy.uhp-nancy.fr*

** *Laboratoire de Morpho-Analyse du Signal, (MAS'Air – CReA), Centre de Recherche de l'Armée de l'air, BA 701, F-13661 Salon Air*

RÉSUMÉ. Cette communication présente une méthode nouvelle d'estimation du diamètre de cibles immergées dans un liquide. L'originalité du procédé repose sur une approche exclusivement temporelle basée sur l'application d'ondelettes continues et discrètes sur la partie quasi rigide de l'écho ultrasonore diffracté.

Après description des points clés relatifs à la méthode, les résultats appliqués à des cibles filaires sont comparés à une technique d'analyse fréquentielle et montrent l'avantage de la méthode temporelle, notamment sur les petits diamètres.

ABSTRACT. This communication presents a new method to estimate the diameter of targets immersed in a diluted medium. The originality of this method is based on an exclusively temporal approach. It uses the discrete and continuous wavelets applied to the quasi-rigid part of the ultrasonic backscattered echo. After some theoretical aspects, we present step by step our method. The results, tested on targets which have a wire structure, are compared to those obtained from a frequency analysis method based on the QRFF concept. Our method is particularly recommended for its accuracy, especially for targets with small diameters, and for its easy implementation.

MOTS-CLÉS: granulométrie, ondelette, ultrason, estimation.

KEYWORDS: granulometry, wavelet, ultrasound, estimation.

1. Introduction

Le thème central de cette communication concerne la caractérisation de cibles immergées dans un liquide. Les procédés actuellement utilisés (Jourdan, 1995) nécessitent une connaissance a priori du matériau. Nous proposons une approche complémentaire de la méthode de (Mathieu *et al.*, 2002), en en reprenant les principaux avantages qui sont d'être sans contact et indépendant de la nature du matériau. Cette dernière repose sur le fait qu'une cible immergée, qui reçoit une onde ultrasonore, produit un écho rétrodiffusé dont la nature et les composantes sont expliquées par la théorie de la diffusion résonante RST (Flax *et al.*, 1981). La première partie de cet écho forme l'écho quasi rigide et est composé de l'onde spéculaire et des ondes de Stoneley qui sont déterminantes car elles contiennent l'information relative à la taille de la cible. La méthode de (Schweitzer *et al.*, 2002) permet d'obtenir de bons résultats en termes de précision et de robustesse. Elle repose sur des arguments issus de l'analyse fréquentielle et de la théorie de l'optimisation. Lorsqu'on l'observe sous un angle différent, on peut mettre en évidence une analyse en échelle des phénomènes. En effet, les discrétisations des a_j et f_j rappellent l'opération de dilatation suivie d'une corrélation qui constituent les opérateurs fondamentaux d'une analyse en ondelettes. Cette dernière analyse le plan temps/fréquence de manière plus pertinente que la transformée de Fourier. Elle offre, de surcroît, une multitude de bases d'analyse susceptibles de trouver au mieux une classe de fonctions la plus adaptée au type de signaux analysés. Nous proposons donc, en prolongement de cette approche, et à partir des mêmes échos ultrasonores, dont les conditions d'acquisition sont décrites dans (Mathieu *et al.*, 2002), d'approfondir la voie d'analyse temps-échelle appliquée à la détermination du rayon d'une cible immergée. Ainsi, après avoir rappelé dans la section suivante les éléments essentiels propres à l'analyse en ondelettes, nous exposons sa mise en œuvre dans le cadre de l'estimation du diamètre filaire. La dernière partie présente les résultats et les compare à ceux de (Schweitzer *et al.*, 2002).

2. La transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes (TO) autorise une exploration fine des structures locales à l'échelle d'observation la plus pertinente susceptible de révéler l'information utile. La TO décompose un signal sur une famille d'ondelettes translatées (b) et dilatées (a) à partir d'une ondelette mère ψ et forme une base d'analyse pouvant être orthonormale. Elle vérifie les propriétés de base suivantes :

- $\psi \in L^2(\mathbb{R})$ et la condition d'ondulation impose une moyenne nulle. Elle est centrée au voisinage de 0 et de norme unitaire.

- La TO d'un signal $s(t)$ est définie par le produit scalaire $W[s_{a,b}] = \langle s | \psi_{a,b} \rangle$

- Les éléments engendrés sont $\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ et permettent un pavage

efficace du plan temps-fréquence.

L'opération mesure donc le comportement de s autour de l'instant b et dans un rayon proportionnel au facteur d'échelle a .

– ψ est caractérisée par un nombre de moments m tel que $\langle t^m | \psi(t) \rangle = 0$.

La TO continue fournit une analyse la plus précise possible sur le plan temps-échelle mais au prix d'une redondance forte de l'information mesurée (coût de calcul). Il existe une alternative permettant d'optimiser l'analyse en utilisant des ondelettes générant des bases orthonormées discrètes de $L^2(\mathbb{R})$:

$$\left\{ \psi_{j,n}(t) = 2^{-j/2} \cdot \psi(2^{-j}t - n) \right\}_{(j,n) \in \mathbb{Z}^2}$$

On constitue de cette façon une analyse multirésolution. Elle examine le signal s par projections orthogonales sur les espaces d'approximation (V_j) et de détails (W_j) et ceci pour toutes les résolutions 2^{-j} possibles. La perte d'information entre deux échelles 2^j et 2^{j+1} est entièrement évaluée par la quantité $\langle s | \psi_{j,n} \rangle$.

Deux filtres h et g facilitent l'implantation de l'approximation multirésolution. Le lien entre le filtre h et la fonction d'échelle φ vérifie :

$$h[n] = \langle \varphi | \varphi_{-1,n} \rangle_{n \in \mathbb{N}} \quad \text{et} \quad |\hat{h}(\omega)|^2 + |\hat{h}(\omega + \pi)|^2 = 2 \quad \text{avec} \quad \hat{h}(0) = 2$$

De la même façon, l'analyse multirésolution dans l'espace des détails W_j est réalisée par le filtre g avec : $g[n] = \langle \psi | \varphi_{-1,n} \rangle_{n \in \mathbb{N}}$.

Ces deux filtres discrets constituent les « filtres miroirs conjugués ». Ils sont d'une extrême importance car ils permettent la mise en œuvre de l'outil très performant que constitue la TO rapide. Nous renvoyons le lecteur à (Daubechies, 1992) et (Mallat, 1998) pour plus de détails.

3. Choix des ondelettes pour la mesure du diamètre filaire

Les échos quasi rigides sur lesquels les méthodes sont appliquées sont visualisés à la Figure 1. Une simple lecture montre qu'une ondelette de Daubechies d'ordre $N > 4$ ou une ondelette de Morlet semblent être de bons candidats à l'analyse de ces signaux. La symétrie caractéristique de l'ondelette de Morlet en fait une candidate idéale pour l'analyse en ondelettes continue. Les ondelettes de Daubechies sont l'archétype même de l'analyse en ondelettes discrète. Elles sont extraordinairement bien adaptées à l'analyse multirésolution. Leur occupation temps-échelle traduit une bonne résolution à la fois temporelle et fréquentielle. Elles permettent une représentation très stable du signal et sont à support compact. Leur nombre de moments est réglable. Elles présentent un éventail « morphologique » complet allant d'un comportement totalement discontinu (db1) en passant par la fractalité (db2) jusqu'à des réponses s'adouissant continument en terme de régularité. Enfin, elles forment une base orthonormale.

4 Caractérisation par ondelettes de cibles immergées dans un liquide

Les comportements temporels des ondelettes choisies pour cette étude, c'est-à-dire l'ondelette de Morlet (morl) et celle de Daubechies d'ordre 7 (db7) sont illustrés respectivement à la Figure 1a et à la Figure 1b. Ces deux ondelettes ont été sélectionnées parmi les meilleures candidates possibles. Elles offrent d'une part, une bonne adéquation entre la rugosité de l'ondelette et celle du signal analysé, et d'autre part, un nombre de moments compatibles avec la morphologie de ce même signal.

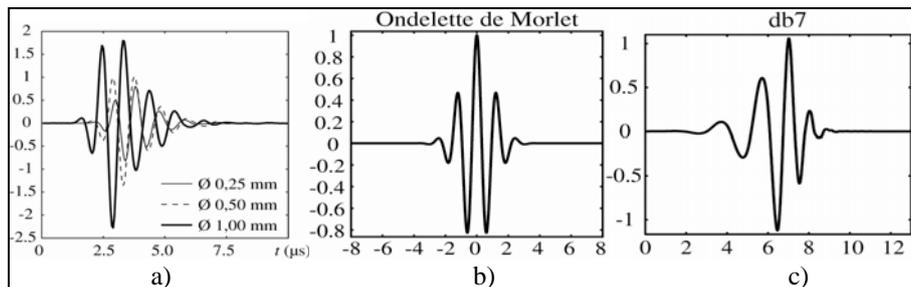


Figure 1. a) Echos quasi rigides typiques étudiés, b) Ondelette continue de Morlet, c) Ondelette discrète db7.

4. Estimation du diamètre filaire

L'objectif de la méthode est de rechercher une base d'ondelettes telle que l'amplitude du plus grand coefficient, à une échelle pertinente, dépende de manière univoque du diamètre du fil, indépendamment de la nature du matériau au sein d'une classe donnée (métaux, matériaux mous, etc).

4.1 Principe de la méthode pour un matériau donné

Dans un premier temps, la méthode proposée s'articule autour de trois étapes :

- décomposer en ondelettes un nombre réduit d'échos couvrant la gamme des diamètres possibles,
- déterminer l'échelle offrant les plus grands coefficients d'ondelettes tout en respectant la relation d'ordre les reliant aux différents diamètres,
- calculer, par approximation polynomiale, les coefficients d'un polynôme qui établira la relation entre ces maxima et les diamètres de référence.

4.2 Extension de la méthode à un matériau quelconque

A partir des résultats précédents, nous proposons deux techniques pour l'obtention d'une relation donnant le diamètre du fil sans a priori sur le matériau.

Première approche

– calcul d'un coefficient moyen pour chaque diamètre, à partir des maxima des coefficients d'ondelettes, dans le cas où de légers écarts apparaîtraient. Nous étudions quatre types de moyenne, arithmétique (A), géométrique (G), harmonique (H) et quadratique (Q), de manière à prendre en compte ces différences le plus judicieusement possible.

– détermination d'un polynôme d'approximation de degré optimum au sens des moindres carrés.

Seconde approche

– calcul d'un polynôme d'approximation ayant les mêmes spécifications que dans la première approche mais où tous les maxima des coefficients d'ondelettes sont pris en compte et donc sans calcul de coefficient moyen. A titre de comparaison, trois polynômes d'ordre 3, 4 et 5 (P3, P4 et P5) sont évalués.

Ces deux techniques sont ensuite appliquées aux différents échos en utilisant trois transformées en ondelettes : la transformée en ondelettes discrète utilisant une ondelette de Daubechies d'ordre 7 (TOD-db7), la transformée en ondelettes continue utilisant une ondelette de Morlet et analysant les échelles de manière continue (TOC-morl-EC), la même transformée en ondelettes continue mais analysant les échelles de manière dyadique (TOC-morl-ED). Les techniques étant décrites, nous pouvons maintenant examiner leur performance quant à la mesure de trois diamètres des deux matériaux testés.

4.3 Mise en œuvre et comparaison de trois techniques de mesure**4.3.1 Mesure par TOD-db7**

Outre le fait qu'ils apparaissent à des échelles différentes, les maxima des coefficients générés à partir de ce type d'ondelettes, dont l'évolution est donnée à la Figure 2, ne respectent pas la relation d'ordre entre les diamètres. De plus, la relation obtenue pour les deux matériaux n'est pas la même. En effet, pour le diamètre 1 mm par exemple, le maximum est le plus petit des trois pour l'acier, alors qu'il est le plus grand pour le cuivre. Bien que son enveloppe corresponde à celle de l'écho, l'ondelette db7, comme toutes celles de la famille Daubechies, oscille de manière irrégulière et cet aspect peut contribuer à la dégradation des résultats. Cette technique sera donc écartée dans la suite de ce travail.

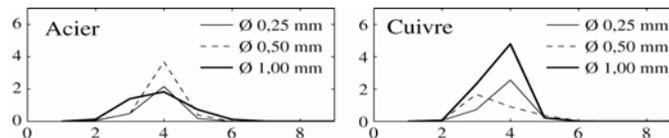


Figure 2. TOD-db7 : maxima des coefficients d'ondelettes en fonction de l'échelle.

4.3.2 Mesure par TOC-morl et analyse continue des échelles

Le résultat de la décomposition en ondelettes par cette approche est indiqué à la Figure 3a. On peut y observer que, non seulement les maxima apparaissent au voisinage de l'échelle 4, mais qu'en plus, la relation d'ordre entre les diamètres est parfaitement respectée et ce, quelque soit le matériau. Les valeurs mesurées par cette solution sont regroupées à la Figure 3b, l'anneau gris représentant la tolérance sur le diamètre de référence ($\pm 10\%$). Elles sont toutes de bonne qualité et il faut noter l'excellent comportement des méthodes P3, P4 et P5 pour les deux matériaux.

Ces résultats s'expliquent par la mise en œuvre d'une transformée en ondelettes continue ainsi que par le choix pertinent de l'ondelette de Morlet dont l'enveloppe et la régularité des oscillations sont en parfaite adéquation avec celles de l'écho.

L'inconvénient majeur d'une transformée en ondelettes continue réside dans le temps de calcul qui est beaucoup plus élevé que dans une approche discrète. C'est la raison pour laquelle nous proposons une troisième technique qui tire avantage des deux précédentes, c'est-à-dire une analyse continue à une échelle donnée mais en explorant les échelles de façon dyadique comme le fait une analyse discrète.

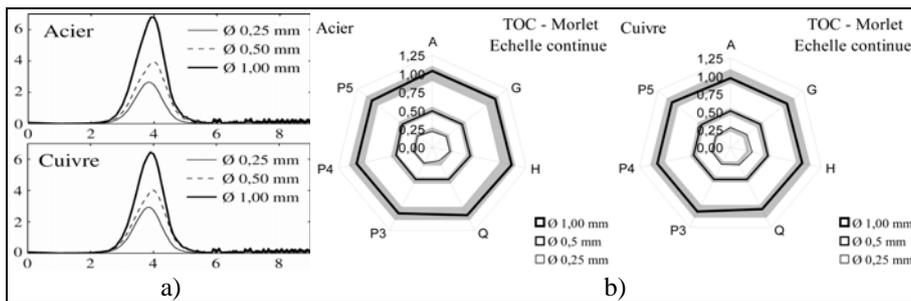


Figure 3. TOC-mor-EC : a) maxima des coefficients d'ondelettes et échelle continue, b) valeur des 3 diamètres mesurée par 8 techniques.

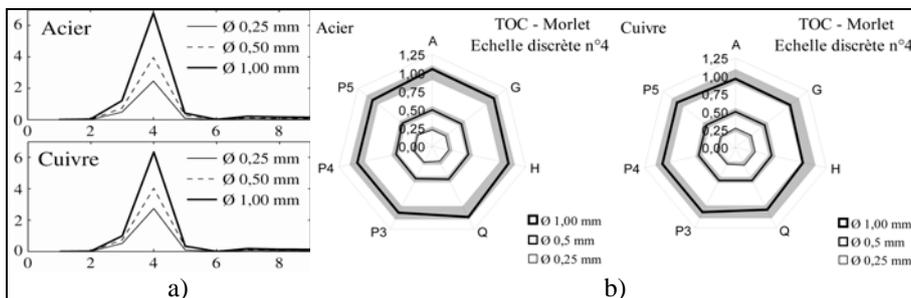


Figure 4. TOC-morl-ED : a) maxima des coefficients d'ondelettes et échelle dyadique, b) valeur des 3 diamètres mesurée par 8 techniques.

4.3.3 Mesure par TOC-morl et analyse dyadique des échelles

La Figure 4a, qui présente l'évolution des coefficients d'ondelettes par cette méthode, montre clairement l'importance de l'échelle 4 qui, à elle seule, concentre tous les maxima et respecte la relation d'ordre sur les diamètres. Les excellents résultats de la Figure 4b indiquent qu'ils sont semblables aux précédents mais avec l'énorme avantage de ne nécessiter qu'une analyse à l'échelle 4. Cette analyse offre donc la possibilité d'obtenir une grande précision dans les mesures en requérant un temps de calcul extrêmement réduit puisque une seule échelle est explorée.

4.4 Comparaison des méthodes TOC-morl-EC et TOC-morl-ED

En comparant l'erreur relative de la mesure par rapport au diamètre de référence calculée pour les deux méthodes, nous constatons, pour le cas des diamètres 0,5 et 1 mm, que le maximum de l'erreur est à 4,5% pour la TOC-morl-EC et à 7% pour la TOC-morl-ED. Les valeurs de référence étant à $\pm 10\%$, il n'est donc pas possible de privilégier une méthode par rapport à l'autre pour ces deux diamètres. En revanche, le cas du diamètre 0,25 mm voit son erreur relative atteindre 18% pour la TOC-morl-EC contre 11% pour la TOC-morl-ED avec une meilleure stabilité par rapport au mode de calcul. Comme la méthode explorant les échelles dyadiques donne des résultats légèrement meilleurs qu'une décomposition en échelles continues et que, de surcroît, sa mise en œuvre ne nécessite que l'analyse de l'échelle 4, il est donc souhaitable d'adopter la méthode de calcul par transformée en ondelette de Morlet continue aux échelles discrètes.

5. Résultats

Les valeurs numériques calculées par la méthode TOC-morl-ED sont synthétisées par le Tableau 1. Elles affichent des résultats très intéressants. En effet, l'erreur relative des méthodes présentées pour les diamètres 1 mm, 0.5 mm et 0.25 mm plafonne respectivement à 5%, 2% et 10%. Ces valeurs sont à comparer à 12%, 12% et surtout 28% pour la méthode de (Schweitzer *et al.*, 2002). Enfin, il faut souligner les excellents résultats des méthodes P3, P4 et P5 dont l'erreur relative ne dépasse pas 4%.

6. Conclusion

La technique de mesure du diamètre d'un fil immergé développée par Schweitzer *et al.* se plaçant sous l'angle fréquentiel, nous avons proposé une nouvelle méthode reposant sur une approche temporelle par une analyse en ondelettes associée à un polynôme d'approximation. Nous avons montré qu'une transformée en ondelettes continue basée sur une ondelette de Morlet examinant exclusivement l'échelle 4 donne de meilleurs résultats que la technique

8 Caractérisation par ondelettes de cibles immergées dans un liquide

fréquentielle. Elle demeure simple de mise en œuvre et ne nécessite pas d'étape préalable de normalisation pour les matériaux étudiés, ce qui reste à confirmer sur l'ensemble de la classe des métaux. Il est souhaitable de prolonger l'étude, dans un premier temps, en testant d'autres familles d'ondelettes sur une plus grande variété de diamètres et de matériaux tout en améliorant la précision des références. Dans un second temps, il sera nécessaire d'adapter le dispositif à des particules en suspension dont l'analyse reposera sur une transformée en ondelettes à deux dimensions.

Diamètres de référence (mm)	Méthodes de calcul	Acier					Cuivre				
		A, G, H, Q**	P3	P4	P5	S*	A, G, H, Q**	P3	P4	P5	S*
Ø 0,25	Ø mesuré (mm)	0,22	0,24	0,25	0,25	0,31	0,27	0,26	0,25	0,25	0,32
	Erreur relative	10%	2%	0%	0%	24%	9%	4%	0%	0%	28%
Ø 0,5	Ø mesuré (mm)	0,49	0,49	0,49	0,50	0,56	0,51	0,51	0,51	0,50	0,56
	Erreur relative	1%	2%	2%	0%	12%	1%	1%	2%	0%	12%
Ø 1,00	Ø mesuré (mm)	1,05	1,00	1,00	1,00	1,08	0,96	1,00	1,00	1,00	1,12
	Erreur relative	5%	0%	0%	0%	8%	4%	0%	0%	0%	12%
* S : méthode de Schweitzer et al.											
** les résultats des différentes moyennes calculées sur deux matériaux étant séparés par de faibles écarts, ils sont présentés dans une même colonne.											

Tableau 1. Valeur et précision relative des mesures par TOC-morl-ED.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier P. Schweitzer et J. Mathieu pour leur avoir transmis les signaux d'étude, ainsi que les relecteurs pour leurs conseils avisés.

7. Bibliographie

- Jourdan MF., Guide de choix des granulomètres et compteurs de particules appliquées à l'analyse des poudres et des suspensions, *Publication EXERA* n° S-3673-X-95, 1995.
- Schweitzer P., Tisserand E., Mathieu J., Ragot J., « Analyse corrélative de signature ultrasonore de cibles immergées : Application à la mesure dimensionnelle », *JESA*, Editions Hermès Lavoisier, vol. 36, n°6, 2002, p.865-878.
- Mathieu J., Schweitzer P., Tisserand E., « Ultrasonic scattering technique for target size measurement », *Measurement Science and Technology*, vol. 13, 2002, p. 660-666.
- Flax L., Gaunard G., Überall H., « Theory of resonance scattering », *Physical Acoustics Principles and Methods*, ed W P Masson and R N Thurston (New York: Academic), vol. 15, 1981, p. 191-29.
- Daubechies I., *Ten Lectures on Wavelets*. SIAM, Philadelphia, PA, 1992.
- Mallat S., *A wavelet tour of signal processing*, San Diego, CA : Academic Press XXIV, 1998.