

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Amélioration de la sensibilité de mesure du paramètre non linéaire de fluides Homogènes en mode écho

L. Haumesser^a et F. Vander Meulen^b

^aGREMAN UMR7347 CNRS, U.Tours, INSA-CVL, GREMAN site ST, 10 rue Thales de Milet, 37100
Tours, France

^bGREMAN - Université de Tours, 3 rue de la chocolaterie, 41034 Blois, France
lionel.haumesser@univ-tours.fr

Le paramètre non linéaire B/A est un indicateur dont l'intérêt se manifeste en imagerie médicale ou en caractérisation de fluides. Son expression est proportionnelle à la distorsion quadratique d'une onde acoustique initialement sinusoïdale, au fur et à mesure de sa propagation. Ainsi, de la sensibilité avec laquelle est mesuré ce facteur de distorsion dépend le contraste des images obtenues ou la finesse du contrôle. Le point de départ de cette étude est l'évaluation du paramètre non linéaire de fluides homogènes en émission réception (mode écho). Dans cette configuration, il est établi que la distorsion du train d'onde effectuant un aller-retour dans le fluide est favorisée lorsque le réflecteur a une impédance supérieure à celle du fluide. Ce faisant, la signature acoustique du système fait apparaître plusieurs trains d'ondes successifs. Les suivants ont effectué des allers-retours supplémentaires au sein du réflecteur avant d'être reçus par le transducteur. Chaque train d'onde fournit une possibilité d'évaluer le paramètre non linéaire. Dans ce travail, la relation de phase qui existe entre ces trains d'ondes est exploitée. Lorsque l'on combine les contenus fréquentiels, cette relation est à l'origine d'une dispersion du facteur de distorsion conduisant, pour les conditions décrites dans ce travail, à une sensibilité accrue d'un facteur trois par rapport à l'exploitation du premier train d'onde seul. Cette amélioration ouvre la possibilité de réduire la distance de propagation de l'onde dans le milieu à tester pour ainsi en réduire le volume nécessaire.

1 Introduction

La pertinence du paramètre acoustique non linéaire B/A est établie en imagerie dans le domaine médical et à des fins de surveillance de processus dans des contextes industriels. Son évaluation est souvent obtenue à partir de mesures réalisées en transmission [1-2]. L'utilisation de deux transducteurs n'est cependant pas appropriée lorsque l'accès au volume de mesure est restreint à un unique versant. Le recourt à une configuration en mode écho devient alors indiqué. Cette situation ne requiert qu'un seul transducteur utilisé successivement en émetteur et en récepteur ainsi qu'un réflecteur donnant lieu au retour des ondes vers le capteur.

Une mise en œuvre simplifiée de la mesure du paramètre non linéaire a été proposée lors d'une précédente étude [3]. Un transducteur mono élément large bande y est utilisé pour émettre une onde sinusoïdale de forte amplitude dans l'eau à température ambiante. Une distorsion quadratique de l'onde naît lors du trajet aller dans l'eau. Un pavé droit en aluminium sert de réflecteur en incidence normale. Le réflecteur dont l'impédance est supérieure à celle du fluide permet au signal non linéaire réfléchi de se cumuler lors du trajet retour, au signal généré lors du trajet aller et d'accroître ainsi le taux de distorsion de l'onde, ce qui facilite l'évaluation du paramètre non linéaire [4]. Cette étude n'avait porté que sur le premier écho reçu alors que le signal contient plusieurs autres contributions issues de vas et viens de l'onde au sein du pavé servant de réflecteur.

Dans ce travail, nous prenons en compte les échos suivants issus de la paroi arrière du réflecteur. Ceci permet de combiner les contributions dans le domaine spectral afin d'accentuer le taux de distorsion et ainsi améliorer la sensibilité avec laquelle la mesure est réalisée. Tout d'abord, l'expérience menée est décrite. Le cadre théorique du modèle donnant la description spatiale du faisceau réel propagé dans le système est précisé. Les signaux sont ensuite analysés dans le domaine fréquentiel. Enfin, l'augmentation de la sensibilité de mesure liée à l'utilisation de plusieurs échos est mise en évidence.

2 Dispositif de mesure et modèle

La mesure du paramètre non linéaire B/A est réalisée en émission réception. Le transducteur utilisé (Panametrics V307) dont la fréquence centrale est égale à 5MHz, a une surface active de 2,54cm de diamètre. Un signal électrique de type train d'onde sinusoïdal contenant 27 périodes est

émis par un système à faible taux de distorsion (Ritec SNAP-5000) et appliqué au transducteur. Les fréquences des sinusoïdes sont dans la gamme 2,6MHz-2,7MHz. Le signal traverse le milieu fluide à caractériser puis est reçu partiellement soit après une réflexion en incidence normale sur la première face du réflecteur, soit après deux transmissions au niveau de cette interface et un nombre impair de réflexions sur la face arrière du réflecteur. Les milieux choisis pour l'étude, de l'eau et de l'aluminium, ont respectivement des épaisseurs de 34mm et 34,9mm de façon à éviter aux échos de se superposer dans la gamme de fréquences de l'étude. Dans cette configuration, le signal temporel a l'allure caractéristique d'une succession de trains d'ondes dont les quatre premiers numérotés de 1 à 4 sont considérés dans ce travail (Fig. 1).

Le parcours effectué par chaque écho est indiqué sur les schémas périphériques: l'amplitude décroissante correspond à l'effet des coefficients de transmission et de réflexion aux interfaces du réflecteur métallique ainsi qu'aux trajets de plus en plus longs au sein du système. Le milieu situé à droite du réflecteur (non représenté sur la figure 1) est considéré d'extension semi infinie et n'apporte pas de contribution au signal. De son impédance dépend néanmoins l'amplitude du signal reçu. Dans ce travail, on choisit de placer de l'eau.

Au cours de sa propagation, l'onde initialement sinusoïdale se distord et chaque train d'onde s'enrichit d'une composante harmonique quadratique. La bande passante du transducteur est suffisante pour recevoir à la fois l'onde primaire et l'harmonique deux générée dans le système. Les pressions acoustiques mesurées à la fréquence de l'émission (fréquence primaire) et au double de la fréquence primaire ont des amplitudes qu'il est nécessaire de déterminer pour la mesure absolue du paramètre non linéaire. Pour ce faire, une procédure expérimentale de calibration demandant la mesure de signaux électriques (tensions et courants à l'émission et à la réception) et basé sur le principe de réciprocité en réflexion est mise en place [3, 5].

La détermination du paramètre non linéaire proposée ici s'appuie également sur un modèle donnant la description du faisceau réel. Ce modèle est basé sur l'équation KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kusnetsov) qui est établie à partir de l'équation de Burger à laquelle les effets de diffraction ont été ajoutés. Il intègre ainsi les effets de non linéarité faible du milieu, d'atténuation et de diffraction du faisceau acoustique dans un milieu supposé fluide, aux deux fréquences [6]. Ce modèle est complété par la prise en compte des coefficients de réflexion et de transmission aux

interfaces [7]. La dimension de la face active du transducteur est prise en compte et les résultats sont exprimés à travers la pression moyenne qui s'exerce sur cette surface. La pression harmonique générée dans chaque couche peut être exprimée par :

$$P_2(x) = \frac{k_2(1+B/2A)P_1^2(x=0)}{2Zc} F \quad (1)$$

où x est la variable d'espace, k_2 le nombre d'onde pour le second harmonique, Z l'impédance du milieu de propagation, c la célérité et F un facteur intégrant les effets de diffraction et d'atténuation. $P_1(x=0)$ est l'amplitude de l'onde primaire à son entrée dans la couche. Le second harmonique total dans cette couche est alors exprimé comme la somme de ce champ généré non linéairement dans la couche et d'une composante linéaire à cette même fréquence, issue des non linéarités créées dans les couches voisines.

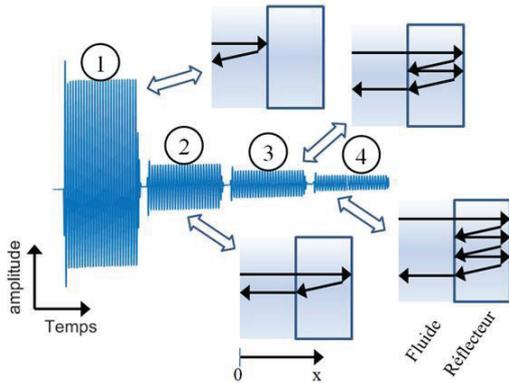


Figure 1: Signal temporel en émission/réception et trajets associés aux échos successifs.

Les propriétés de l'eau et de l'aluminium déterminées expérimentalement et listées dans le tableau 1 servent de données d'entrée au modèle. En complément, l'atténuation non négligeable dans l'eau aux fréquences f de l'étude est calculée selon la loi $0,025 \cdot 10^{-12} f^2$.

Tableau 1: Propriétés des milieux de propagation.

	c (m.s ⁻¹)	Z (MRay)	$1+B/2A$
Eau	1490	1,49	3,5
Aluminium	6365	17,78	5

3 Résultats et analyse

Au sein des différents trains d'ondes, la quantité d'harmonique deux évolue avec la distance. Ainsi pour le premier écho, la pression harmonique générée est de l'ordre de 5500Pa en moyenne sur la plage étudiée (Fig. 2b). La composante fondamentale est importante tout au long du parcours de l'onde en dépit des effets de diffraction et de la présence de l'interface eau/aluminium, si bien que la génération harmonique reste significative y compris lors du trajet retour [3].

En ce qui concerne les trains d'ondes suivants (échos 2, 3 et 4), la composante fondamentale décroît progressivement en raison des mêmes effets cette fois

répétés à mesure que le chemin de propagation s'allonge. En conséquence, la quantité d'harmonique deux générée diminue d'écho en écho. Les traiter de façon individuelle ne conduit donc pas à une amélioration notable de l'évaluation du paramètre non linéaire.

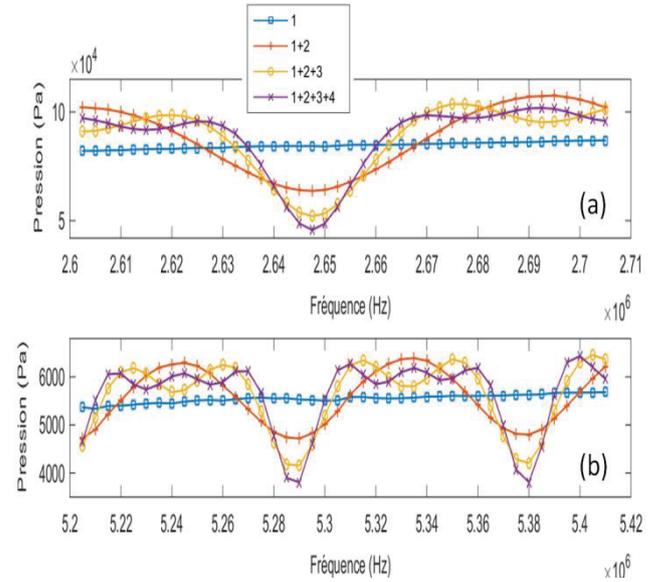


Figure 2: coefficients de réflexion pour différentes combinaisons d'échos : linéaire (a), second harmonique (b).

Puisqu'ils sont issus de la même source, une relation de phase lie les différents trains d'ondes reçus. Pour la faire apparaître, une transformée de Fourier est appliquée sur chaque train d'onde dans sa partie stationnaire. Les coefficients complexes obtenus sont sommés à chaque fréquence. Le module du résultat est présenté sur la figure 2 et s'apparente à un coefficient de réflexion linéaire (a) et "non linéaire" (b) du pavé réflecteur. Il apparaît que la réponse du système varie en fonction de la fréquence dès que le contenu d'au moins deux trains d'ondes est combiné.

Le coefficient de réflexion de la figure 2a passe par une valeur minimale qui s'accroît lorsque le nombre d'échos pris en compte augmente. A cette valeur minimale correspond une fréquence de résonance f_n du réflecteur métallique dont le mode n peut être approché à partir de la relation :

$$f_n = \frac{nc}{2e} \quad (2)$$

Pour $e = 34,9\text{mm}$ et $f_n = 2,647$ on obtient $n = 29$. On observe sur la figure 2b que les minima interviennent à des fréquences séparées de près de 91kHz, valeur qui correspond au rapport $c/2e$. Le spectre correspondant à l'harmonique deux généré dans le système est lui aussi marqué par les fréquences de résonances du réflecteur.

La relation (1) montre que le paramètre B/A dépend linéairement du rapport $P_2(x)/P_1^2(x=0)$. Ce rapport s'apparente à un taux de distorsion harmonique quadratique qui dépend de la distance. Puisqu'une dépendance fréquentielle est apparue en sommant les contributions à P_1 et à P_2 , la distorsion est également dispersive. L'évaluation de la distorsion est faite pour deux fréquences dont l'une correspond à des minima pour P_1 et P_2 . Pour cette fréquence seulement (2,65MHz) le taux de distorsion croît en fonction du nombre d'échos. Lorsque quatre échos sont

pris en compte, la distorsion est trois fois supérieure à celle du premier écho seul.

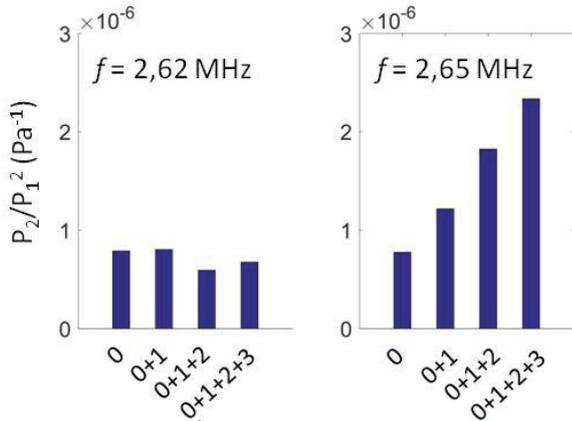


Figure 3: taux de distorsion en fonction du nombre d'échos pour deux fréquences.

Compte tenu des paramètres des milieux, la relation (1) met en évidence que le taux de distorsion dans une couche d'aluminium sera un ordre de grandeur en dessous de celle dans une couche d'eau [8]. Finalement, le taux de distorsion évalué est pour l'essentiel lié à la génération du second harmonique dans l'eau, ce qui rend possible l'évaluation du paramètre non linéaire avec une sensibilité de mesure accrue.

4 Conclusion

Dans ce papier nous proposons une méthode pour augmenter la sensibilité de mesure du paramètre B/A dans les fluides sur la base d'une configuration de type pulse-écho. Les contenus fréquentiels des échos successifs provenant des interfaces du réflecteur sont combinés de manière à tirer parti de la relation de phase qui les lie. Lorsque les fréquences des trains d'ondes correspondent à des fréquences de résonance du réflecteur, le taux de distorsion de l'onde augmente très nettement. L'évaluation du paramètre non linéaire qui est proportionnel au taux de distorsion bénéficie donc de cette augmentation de la sensibilité de mesure. Une augmentation d'un facteur voisin de trois est atteinte dans les conditions décrites dans cette étude. Cette augmentation est obtenue sans modifier la quantité de fluide requise. Comme prolongement de ce travail, un suivi du paramètre non linéaire évoluant dans de faibles proportions est envisagé.

Remerciements

Les auteurs remercient Monsieur Christophe Brosseau de l'IUT de Blois pour sa collaboration technique efficace lors de la mise en place des mesures.

Références

- [1] L. Adler and E. A. Hiedemann, *J. Acoust. Soc. Am.* **34**, 410-412 (1962).
- [2] F. Chavrier, C. Lafon, A. Birer, C. Barrière, X. Jacob and D. Gathignol, *J. Acoust. Soc. Am.* **119**, 2639-2644 (2006).
- [3] F. Vander Meulen and L. Haumesser, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 214106 (2008).
- [4] M. A. Breazeale and W. W. Lester, *J. Acoust. Soc. Am.* **33**, 1803-1805 (1961).
- [5] G. E. Dace, R. B. Thomson and O. Buck, *Rev. Prog. QNDE* **11B**, 2069-2076 (1992).
- [6] G. Du and M. A. Breazeale, *J. Acoust. Soc. Am.* **80**, 212-216 (1986).
- [7] F. Vander Meulen and L. Haumesser, *Ultrasonics* **72**, 34-41 (2016).
- [8] B. J. Landsberger and M. F. Hamilton, *J. Acoust. Soc. Am.* **109**, 488-500 (2001).