

Identification passive en milieux acoustiques faiblement visqueux

Expérimentations

Mikael CARMONA¹, Olivier MICHEL², Jean-Louis LACOUME², Barbara NICOLAS²

¹CEA-Leti, MINATEC Campus
17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex, France

²GIPSA-Lab
961 rue de la Houille Blanche, BP 46 F- 38402 Grenoble Cedex, France
mikael.carmona@cea.fr, olivier.michel@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – Les travaux présentés dans ce papier portent sur l’illustration expérimentale d’identification passive d’un milieu de propagation acoustique. Cette dernière consiste à estimer la réponse impulsionnelle, ou fonction de Green, entre deux points de mesure à partir uniquement de sources non contrôlées, également appelées "bruits ambiants". Le contexte théorique de l’identification passive nécessite la considération d’un modèle de dissipation dans l’équation qui décrit la propagation du champ de pression. Les expérimentations mises en oeuvre montrent que le modèle de dissipation visqueuse se révèle plus pertinent que le modèle de dissipation constante généralement considéré. Ces données permettent également de discuter l’effet du nombre de sources, du type de sources et des propriétés spectrales et statiques des sources sur la qualité de l’estimation de la fonction de Green.

Abstract – This paper presents an experimentation about passive identification of an acoustic propagation medium. This latter consists in estimating the impulse response, also called Green function, between two measurement points by using uncontrolled sources. The theory of passive identification implies the consideration of a dissipation model in the pressure propagation equation. The experimentation highlights the relevance of the viscous damping model beside the constant damping model usually considered. Data also provide interesting elements for discussing the effect of the number of sources, the spectral and statistical properties of the sources on the quality of the Green function estimation.

1 Introduction

L’identification passive est l’estimation de la fonction de Green (ou réponse impulsionnelle) d’un milieu de propagation à partir uniquement du bruit ambiant *i.e.* de sources non contrôlées. Cette méthode, qui trouve ses prémices dans [1], est développée depuis plus d’une dizaine d’années principalement en acoustique [2], en sismologie [3], en mécanique des structures [4] et en électromagnétisme [5].

L’estimation passive de la fonction de Green d’un milieu de propagation entre deux points de mesure combine deux étapes. La première utilise la corrélation du bruit ambiant enregistré par les capteurs (acoustiques ou sismiques). Sous l’hypothèse de décorrélation spatiale et temporelle du bruit ambiant (on parle de bruit blanc spatio-temporel), la corrélation obtenue est la convolution en temps et en espace de la réponse impulsionnelle. Cette fonction est la corrélation de Green (ou corrélation du bruit ambiant). La deuxième étape est l’utilisation d’une identité de Ward, déduite de l’équation de propagation du milieu, qui transforme la corrélation de Green en la fonction de Green recherchée.

En pratique, le bruit ambiant n’est généralement pas blanc en temps et en espace et ce sont les codas des sources impulsionnelles (et non contrôlées) qui sont utilisées. Une coda (analogue

au fouillis en radar) est le signal enregistré en un point d’un milieu ergodique et invariant dans le temps généré par l’émission d’une source impulsionnelle à partir d’un certain temps (cf. figure 1). Ce temps est le temps de mélange (mixing time). Il a été observé (et encore non rigoureusement démontré [6]) que la corrélation de codas entre deux points de mesure tend vers la corrélation d’un bruit blanc spatial et temporel entre ces deux points de mesure. Cette méthode est donc encore empirique des points de vue théorique et expérimental. La nécessité des hypothèses sur le milieu (ergodique, mélangeant) et le lien avec les propriétés statistiques des codas ne sont également pas encore démontrés.

Pour les milieux acoustiques (propagation du champ de pression), il a été démontré dans [7] puis plus généralement dans [6] que la dissipation doit être prise en compte pour établir l’identité de Ward du milieu. A ce titre, on trouve deux modèles de dissipation considérés dans la littérature : la dissipation constante [2, 3] et la dissipation visqueuse [8]. La dissipation constante mène à une identité de Ward exacte et simple : la fonction de Green est proportionnelle à la partie causale de la dérivée temporelle de la corrélation de Green. Pour les milieux acoustiques, ce modèle de dissipation est peu réaliste (cf. [8]). Dans le deuxième cas, l’identité de Ward est valide pour

une faible dissipation visqueuse et relie proportionnellement la fonction de Green à la partie causale de la dérivée troisième de la corrélation de Green.

Dans ce papier, on illustre expérimentalement la validité du modèle de dissipation visqueuse dans le processus d'identification passive des milieux acoustiques faiblement visqueux. Le protocole compare la fonction de Green d'une salle (entre deux points) estimée par filtrage adapté et les fonctions de Green estimées par identification passive selon les deux modèles existants : dissipation constante et faible dissipation visqueuse.

2 Formalisation et expérimentations

2.1 Fonction de Green d'un milieu acoustique.

On considère un milieu acoustique X , supposé linéaire et invariant dans le temps. La fonction de Green G relie le champ source f au champ de pression p en un point de réception x_r et à l'instant t par la relation suivante :

$$p(t, x_r) = \int_{\mathbb{R} \times X} G(t - s, x_r, y) f(s, y) ds dy \quad (1)$$

$$= (G \otimes_{T,S} f)(t, x) \quad (2)$$

L'analogie avec les systèmes linéaires est immédiate en considérant dans cette équation une source localisée en temps et en espace $f(t, x) = \delta(t)\delta(x, x_e)$ où x_e est un point du milieu. $G(\cdot, x_r, x_e)$ est la réponse impulsionnelle du système virtuel dont x_e est l'entrée et x_r la sortie.

Pour un milieu homogène dont la vitesse de propagation constante est notée v , la fonction de Green s'écrit :

$$G(t, x_r, x_e) = \frac{\delta(t - \tau)}{4\pi v^2 \|x_r - x_e\|} + h(t - t_h) \quad (3)$$

où $\tau = \|x_r - x_e\|/v$, $\|\cdot\|$ est la norme euclidienne et h est une fonction causale avec $t_h > \tau$. G est donc la somme d'un retard pur (issu du trajet direct source-récepteur) et de retards liés aux réflexions sur les interfaces du milieu (réverbération).

2.2 Corrélation de Green et identité de Ward.

La corrélation de Green, qui donne la corrélation des champs observés entre deux points en présence d'un bruit blanc spatio-temporel, est :

$$C = G \otimes_{T,S} G^* \quad (4)$$

où G^* est la fonction de Green retournée temporellement. La formule ci-dessus est une généralisation de la formule des interférences pour un système linéaire classique (pas de variations spatiales) lorsque la source est un bruit blanc. La corrélation de Green est reliée à la fonction de Green par une identité de Ward qui dépend du modèle de propagation. Pour une dissipation constante, la relation est la suivante [7, 6] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{a} \text{Imp}G \quad (5)$$

où a est le coefficient d'amortissement et $\text{Imp}G = 1/2(G - G^*)$ est la partie impaire de la fonction de Green. Pour une dissipation visqueuse, la relation est [8] :

$$\frac{\partial^3 C}{\partial t^3} \approx \frac{v}{a} \text{Imp}G \quad (6)$$

où l'approximation est valide pour un faible coefficient d'amortissement.

2.3 Expérimentation en acoustique aérienne.

L'objectif de l'expérimentation mise en oeuvre est de comparer les identités de Ward pour les modèles de dissipation constante et visqueuse. On considère une salle (8 m × 5 m × 3 m) instrumentée par deux microphones espacés de $d = 23\text{cm}$ dont la bande de fréquence est 4 Hz-16 kHz (cf. figure 1). Dans cette bande de fréquences, pour une température de 20° et une humidité d'environ 60 %, on a $v = 340\text{m/s}$ et une très faible dissipation visqueuse [9]. Pour avoir une fonction de Green de référence, on utilise une méthode active qui consiste à générer un signal connu à l'endroit du premier microphone. La fonction de Green de référence est calculée à partir des signaux enregistrés par les deux microphones par la méthode des moindres carrés récursifs (cf. figure 2).

Dans un deuxième temps, des sources impulsionnelles sont générées une à une et aléatoirement dans la salle supposée "mélangeante" (dans le sens où la corrélation de codas approche la corrélation d'un bruit blanc spatio-temporel) par ses interfaces et obstacles (cf. figure 1). Les mesures des deux capteurs sont donc constituées de trains d'impulsions acoustiques. Pour chaque capteur, environ 600 codas sont extraites, corrélées puis cumulées. Cette opération fournit une approximation de la corrélation de Green. Cette dernière est dérivée numériquement une fois (modèle de dissipation constante) et trois fois (modèle de dissipation visqueuse), cf. figures 3 et 4. Aucun filtre n'a été appliqué sur les estimations de la corrélation de Green et ses dérivées afin de rendre compte de la convergence du procédé sans prétraitements.

La comparaison des dérivées première et troisième de la corrélation de Green avec la fonction de Green montrent la pertinence du modèle de dissipation visqueuse relativement au modèle de dissipation constante. Bien que l'argument maximal soit localisé au temps de vol théorique $\tau = d/v = 0.67\text{ms}$ pour les deux cas (erreurs de quelques μs), la dérivée troisième est une estimation plus précise de la fonction de Green théorique qui est un retard pur dans cette fenêtre d'observation. Il faut noter que malgré la meilleure précision du modèle de dissipation visqueuse, ce dernier fait intervenir une dérivée troisième dans l'identité de Ward qui diminue significativement le rapport signal-à-bruit. Pour pallier à cela, il faudrait appliquer un filtre adapté basé sur une mesure préalable de la puissance du bruit ambiant. Cela n'est volontairement pas présenté ici.

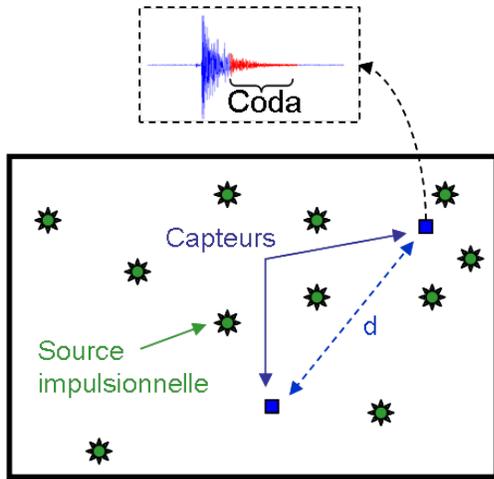


FIGURE 1 – Schématisation de la configuration expérimentale en passif. Le schéma n'est pas à l'échelle et les obstacles (chaises, meubles, etc.) ne sont pas représentés.

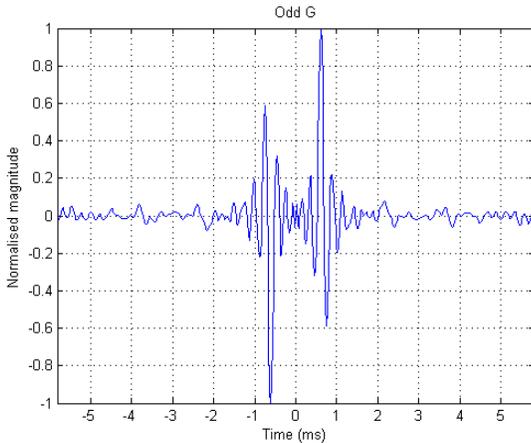


FIGURE 2 – Partie impaire de la fonction de Green estimée par la méthode active des moindres carrés récursifs (filtrage adapté).

2.4 Discussions.

D'autres expérimentations ont été menées en modifiant les distances inter-capteurs, la salle acoustique, le type d'impulsions (pas, claquements, etc.). On peut dégager des analyses générales sur les points suivants :

- La diminution du rapport signal-à-bruit par les opérations de dérivées empêche l'accès à la fonction de Green sur des temps plus longs. Les premières réflexions sont noyées dans le bruit. Lorsque l'on dispose d'un *a priori* sur la fonction de Green à estimer (ce qui n'est pas pris en compte dans ce papier), des méthodes complémentaires (cepstres, par exemple) pourraient être appliquées pour extraire ces réflexions.

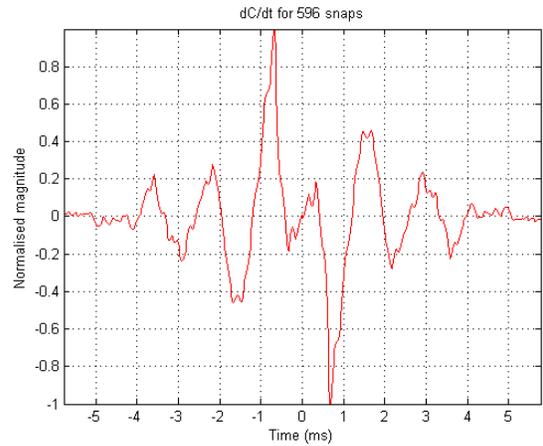


FIGURE 3 – Estimation de la dérivée première de la corrélation de Green (erreur sur le temps de vol de quelques μ s).

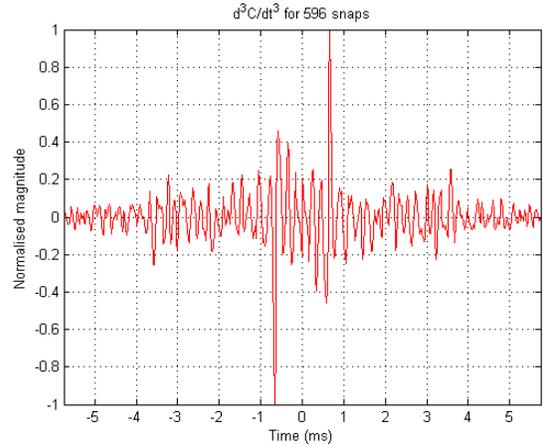


FIGURE 4 – Estimation de la dérivée troisième de la corrélation de Green (erreur sur le temps de vol de quelques μ s).

- Les temps de début de coda et de fin de coda sont estimés à l'aide de la puissance du signal reçu pour chaque événement (on trouvera dans [10] une méthode plus élaborée pour l'estimation du début de coda). Les expérimentations montrent qu'une estimation trop sévère de ces temps (intervalle considéré inclus dans l'intervalle théorique de la coda) est préférable. Bien que l'on perde du signal utile, une intersection de l'intervalle d'observation avec une partie cohérente (début du signal) ou avec le bruit de fond (fin du signal) mènent à une estimation significativement dégradée la fonction de Green.
- La convergence des inter-corrélations cumulées des codas vers la corrélation de Green est expérimentalement quantifiable en comparant, en norme L2 (norme pessimiste), deux estimées successives. Un seuil sur ce critère peut être considéré pour automatiser le processus d'estimation passive. Toutefois, la sélection

tion/réjection automatique des signaux "utilisables" pour l'estimation passive *i.e.* qui contiennent une coda demeure un challenge.

3 Conclusion

Cette expérimentation a illustré la pertinence du modèle de dissipation visqueuse dans le procédé d'identification passive en acoustique. L'identité de Ward associée fait intervenir une dérivée temporelle troisième qui demeure robuste si le nombre de sources impulsionnelles est suffisant. Les futurs travaux portent sur trois aspects : l'étude de la borne de Cramer-Rao relative à l'estimation passive de temps de vol, l'effet de la répartition spatiale des sources impulsionnelles non contrôlées dans l'estimation de la fonction de Green, et, l'estimation du temps de vol directement à partir de la corrélation de Green évitant ainsi l'utilisation d'une identité de Ward.

Références

- [1] H.B. Callen, T.A. Welton *Irreversibility and Generalized Noise*. Physical Review 83, 1951.
- [2] R.L. Weaver, O.I. Lobkis, *On the Emergence of the Green's Function in the Correlations of a Diffuse Field*, Ultrasonics 40, 2001.
- [3] M. Campillo, A. Paul, *Long-Range Correlations in the Diffuse Seismic Coda*, Science 299, 2003.
- [4] K. Wapenaar *et al.*, *Tutorial on Seismic Interferometry : Part 1 - Basic Principles and Applications*, Geophysics 75, 2010.
- [5] E. Slob and K. Wapenaar, *Electromagnetic Green's functions retrieval by cross-correlation and cross-convolution in media with losses*, Geophysical Research Letters 34, 2007.
- [6] Y. Colin de Verdière, *Semi-Classical Analysis and Passive Imaging*, Non Linearity 22, 2009.
- [7] J.L. Lacoume, *Tomographie Passive : Observer avec du Bruit*, GRETSI, 2007.
- [8] M. Carmona *et al.*, *Ward identities for visco-acoustic and visco-elastic propagation media*, Wave Motion 49, 2012.
- [9] D.R. Lide, H.P.R. Frederikse, *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press - 78th edition, 1997.
- [10] G. Defrance, L. Daudet et J-D. Polack, *Using Matching Pursuit for estimating mixing time within Room Impulse Responses*, Acta Acustica 95, 2009. 1071-1081(11)