



HAL
open science

Techniques de Focalisation par Retournement Temporel dans le Domaine Audible

Eric Bavu, Charles Besnainou, Vincent Gibiat

► **To cite this version:**

Eric Bavu, Charles Besnainou, Vincent Gibiat. Techniques de Focalisation par Retournement Temporel dans le Domaine Audible. 8ème Congrès de la Société Française d'Acoustique - CFA2006, Apr 2006, Tours, France. hal-02088405

HAL Id: hal-02088405

<https://hal.science/hal-02088405>

Submitted on 10 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Techniques de Focalisation par Retournement Temporel dans le Domaine Audible

Eric BAVU¹, Charles BESNAINOU², et Vincent GIBIAT³

¹ *Laboratoire d'Acoustique Musicale, U.M.R. CNRS 7604, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France /
Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada*

² *Laboratoire d'Acoustique Musicale, U.M.R. CNRS 7604, Université Pierre et Marie Curie, Paris, France*

³ *Laboratoire PHASE, E.A. 3028, Université Paul Sabatier, Toulouse, France*

Contact : bavu@lam.jussieu.fr

Résumé

Cette étude présente les propriétés de focalisation acoustique spatio-temporelles par retournement temporel (RT) dans le domaine audible en fonction de l'environnement dans lequel l'expérience est menée. La possibilité de réaliser une focalisation par RT grâce à un miroir composé d'un transducteur sera démontrée dans un milieu réverbérant. Malgré leur élégance et leur adaptivité, ces méthodes de focalisation ne permettent pas de focaliser en super-résolution. Le puits acoustique, pour la première fois mis en place dans le domaine audible permet, lui, d'obtenir une résolution accrue par rapport à la focalisation par RT classique et de vaincre la limite physique de diffraction imposée par cette dernière. Nos résultats expérimentaux montrent la possibilité de créer une tache focale à $\frac{\lambda}{7}$.

Introduction – Rappels

À ce jour, peu d'applications des miroirs à retournement temporel (MRT) ont été développées dans le domaine des fréquences audibles [1],[2]. Nous avons mis en œuvre plusieurs techniques de focalisation dans ce domaine, en s'inspirant largement des travaux existant dans le domaine ultrasonore. La focalisation est un problème important à résoudre dans le domaine de l'acoustique. Cette problématique trouve ancrage dans des domaines aussi divers que le contrôle non destructif, l'imagerie médicale, la thérapie, la communication, et la reconstruction de champ sonore. À ce jour, plusieurs approches ont été proposées, souvent basées sur la modélisation du milieu de propagation [3], ou sur le principe de Huyghens [4],[5]. Ce but peut également être atteint en tirant profit de l'invariance par RT de l'équation des ondes dans un milieu non dissipatif [6]. Les techniques de RT, mises au point dès 1986 par Mathias FINK (LOA, ESPCI) et son équipe ont connu un succès important, notamment dans le domaine de l'acoustique ultrasonore. Celles-ci sont entièrement basées sur l'invariance par RT de l'équation des ondes (dans le cas d'une propagation adiabatique) et sur le principe de Huyghens. Dans le domaine audible, le principe sous-jacent est le même. Cependant, dans ce domaine de fréquences, le rapport entre les tailles d'objets étudiés et les longueurs tendant vers 1, l'acousticien se place en champ proche (zone de Fresnel) plutôt qu'en champ lointain (zone de Fraunhofer).

Un MRT est composé de N capteurs, colocalisés avec N sources acoustiques. Pour refocaliser une onde par RT dans un milieu non dissipatif, le processus suit deux étapes : une étape d'acquisition, suivi d'une étape d'émission. Pendant l'étape d'acquisition, l'onde émise par une source initiale S est émise dans le milieu non dissipatif et inhomogène inclus dans un volume V . Le champ sonore émis est alors enregistré par les N capteurs sur la surface fermée S entourant le volume V considéré (Figure 1).

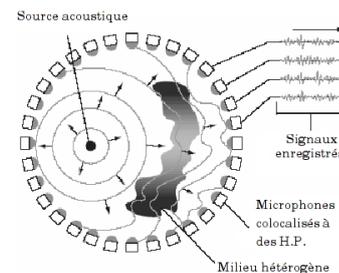


Figure 1: *Étape d'acquisition : une source ponctuelle émet une onde. Le champ est enregistré par les capteurs sur la surface (S) entourant le volume V*

D'après le principe de Huyghens, la connaissance des fonctions de Green et des valeurs ainsi que leurs dérivées normales du champ sur la surface (S) permet d'accéder aux valeurs du champ dans le volume V [7],[8]. Par ailleurs, d'après le principe d'échantillonnage de Shannon, il est inutile de connaître les valeurs du champ partout sur la surface (S) : il suffit de les échantillonner spatialement d'une demi-longueur d'onde [9],[10]. En combinant ces propriétés avec l'invariance par RT des ondes acoustiques dans un milieu où les processus adiabatiques dominent, il est possible de recréer l'onde acoustique se propageant en sens inverse et de focaliser cette onde à la position exacte de la source initiale enregistrée. Pour cela, il suffit d'émettre simultanément sur chacun des émetteurs colocalisés aux capteurs (Figure 2) les signaux renversés temporellement. Une onde convergente est alors recréée par interférences, et toutes les ondes émises par chacun des haut-parleurs du miroir interfèrent constructivement à l'instant du collapse au point S , créant ainsi un point focal. La tache focale créée par cette technique est limitée par des effets de diffraction, et ne peut être plus petite qu'une demi longueur d'onde.

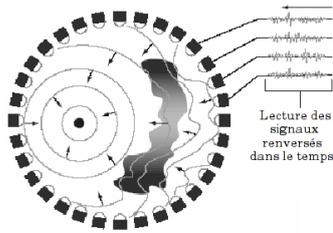


Figure 2: *Étape de reconstruction: les signaux enregistrés sont renversés dans le temps et sont réémis par chacun des hauts-parleurs. Le champ retourné temporellement se propage alors dans le sens inverse et refocalise exactement au point S.*

Influence de l'environnement

Des expériences de focalisation acoustique par RT ont été réalisées dans une salle d'écoute amortie hexagonale d'arête 1.1 m (salle A) et dans une salle parallélépipédique réverbérante ($5 \times 6 \times 3 \text{ m}^3$) (salle B) afin d'extraire l'influence de la salle et de l'environnement sur la focalisation acoustique. Dans la salle A, le MRT est composé de 12 transducteurs, répartis aux sommets d'un dodécaèdre sur les parois de la salle. Les signaux focalisés présentent un spectre correspondant à une fenêtre de Blackmann centrée à la fréquence f_0 variable et de largeur de bande $\Delta f \lesssim 2 \times f_0$. Ce type de signal a été choisi pour respecter les contraintes du RT. Ces techniques sont en effet plus efficaces pour des signaux de type impulsionnel à large bande fréquentielle [11]. De plus, les signaux utilisés présentent une forte composante fréquentielle autour de f_0 , permettant de faire une étude de la qualité de focalisation en fonction de la longueur d'onde.

On peut voir sur la figure 3 les résultats obtenus après focalisation par RT. Cette figure représente le scan dans l'espace de l'intensité acoustique mesuré par un microphone de référence monté sur un banc de mesure motorisé, pour $f_0 = 2500 \text{ Hz}$.

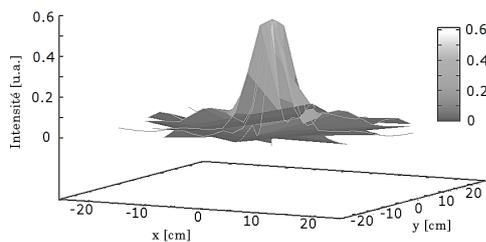


Figure 3: *Scan dans l'espace de l'intensité acoustique mesurée à l'instant du collapse lors de l'expérience de focalisation par RT dans la salle A. Le plan horizontal représente les coordonnées du microphone par rapport au point focal, et l'intensité est représentée verticalement (unités arbitraires) $\Delta f = 3000 \text{ Hz}$ and $f_0 = 2500 \text{ Hz}$.*

Cette figure montre que la focalisation effectuée est efficace au niveau spatial, présentant cependant des lobes secondaires marqués. Afin de comparer la figure de focalisation à la théorie, la figure 4 a été tracée, correspondant à une coupe transverse de la figure 3. On peut alors constater que la figure de diffraction obtenue se rapproche fortement de la tache focale prévue par la théorie, corre-

spondant à la première fonction de Bessel, de largeur à mi-hauteur égale à $\frac{\lambda}{2}$. Cette mesure a été reproduite pour différentes fréquences centrales, validant le fait que la limite de résolution théorique d'une demi-longueur d'onde ne peut être dépassée, mais présentant des résultats très proches de la limite idéale.

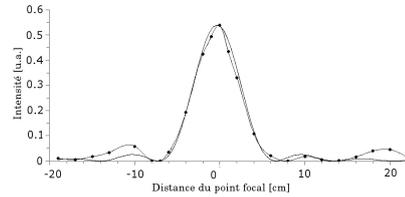


Figure 4: *Scan de l'intensité acoustique dans le domaine spatial à l'instant du collapse de la focalisation effectuée grâce à un MRT. Points : résultats expérimentaux – Trait plein : Modèle théorique*

Dans le domaine temporel, le signal mesuré au point focal correspond exactement au signal initial, retourné dans le temps, avec un niveau signal à bruit très faible. La focalisation temporelle réalisée dans cette salle est donc de très grande qualité.

Les mêmes expériences ont été menées dans la salle B afin d'isoler les différences essentielles entre ces deux environnements sur la qualité de focalisation spatio-temporelle. Dans ce milieu, les expériences ont été menées avec 42 transducteurs placés aléatoirement dans la salle. Les résultats expérimentaux montrent que la qualité de focalisation spatiale est accrue par rapport à la salle A, mais que le niveau signal à bruit dans le domaine temporel est plus faible dans la salle B. En effet, les multiples réflexions sur les parois de la salle créent des transducteurs virtuels qui contribuent à la focalisation et viennent augmenter le nombre de transducteurs du miroir, améliorant ainsi la reconstruction du champ dans le domaine spatial. Cependant, ces mêmes multiples réflexions viennent dégrader la qualité du signal focalisé dans le domaine temporel. Le niveau signal à bruit temporel diminue alors. Ici encore, la limite de résolution n'est pas dépassée, mais est presque atteinte dans toutes nos expériences :

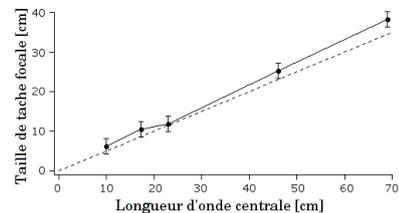


Figure 5: *Largeur de la tache focale en fonction de la longueur d'onde centrale dans la salle B : données expérimentales (trait plein) et résolution théorique optimale (pointillés)*

Ces résultats nous montrent que même si les techniques de RT sont adaptatives, l'environnement influe sur la qualité de focalisation spatio-temporelle : un environnement réverbérant permet d'améliorer, à nombre de transducteurs égal, la focalisation spatiale, mais les mul-

tiples réflexions détériorent la qualité du signal dans le domaine temporel. Il s'agit alors de trouver un compromis suivant les applications désirées.

RT à transducteur unique

Un environnement réverbérant crée des sources virtuelles. Ces sources virtuelles viennent contribuer à la reconstitution du champ et laissent envisager de réaliser une focalisation par RT en utilisant un seul transducteur [12]. En effet, toute l'information nécessaire à la reconstitution du champ acoustique est contenu dans le champ réverbéré. Ainsi, dans un environnement fortement réverbérant, en enregistrant à l'aide d'un seul microphone le champ émis par une source dans le volume V et en émettant le signal retourné dans le temps, les transducteurs virtuels créés par réverbération viennent contribuer au champ et permettent de focaliser efficacement une onde acoustique [13]. Nous avons validé expérimentalement ce résultat dans le domaine audible, en comparant la focalisation spatio-temporelle obtenue grâce, d'une part, à un MRT composé de 43 transducteurs, et d'autre part, à un MRT composé d'un seul transducteur. La figure 6 démontre qu'il est possible expérimentalement de focaliser une onde acoustique sur un point donné de l'espace à l'aide d'un MRT à transducteur unique. Les résultats montrent, malgré un niveau signal à bruit amoindri dans les deux domaines spatiaux et temporels, une résolution spatiale et une compression temporelle tout aussi précise qu'avec 43 transducteurs. Ce résultat essentiel permet d'envisager de réaliser de la focalisation acoustique extrêmement précise sur des structures à très peu de frais.

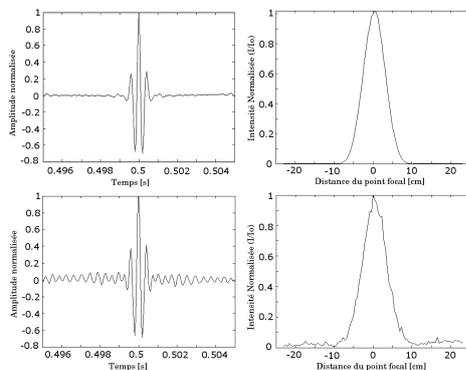


Figure 6: Représentation temporelle du signal reçu au point focal (gauche) et scan de l'intensité acoustique à l'instant du collapse (droite) dans la salle B obtenus grâce à MRT de 43 transducteurs (haut) et grâce à un seul transducteur (bas). $f_0 = 3500$ Hz et $\Delta f = 1.97f_0$

Le puits acoustique : vers la focalisation à super-résolution

Comme énoncé précédemment, les techniques classiques de focalisation par RT ne permettent pas de créer de tache focale plus petite qu'une demi longueur d'onde. Cette limitation théorique provient du fait que le processus de RT ne crée pas l'image duale de la propagation initiale

[14],[15]. En effet, lors du processus de focalisation par RT, comme présenté sur la schéma suivant (Figure 7), après émission simultanée des signaux renversés dans le temps par le miroir, une onde strictement convergente est créée (b). Toutes les ondelettes générées par les transducteurs du MRT se rencontrent au point focal à l'instant du collapse pour interférer constructivement. Par conservation du flux d'énergie, une onde divergente est créée dès l'instant du collapse dépassé (c). La superposition de l'onde convergente et de l'onde divergente ainsi créée une figure de diffraction limitant la résolution de la tache focale. Après un temps donné, il ne reste plus qu'une onde divergente (d) [16].

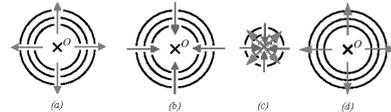


Figure 7: Description schématique du processus de RT

Ainsi, pour vaincre la limite de diffraction et améliorer la résolution spatiale, il suffit de supprimer l'onde divergente [14],[17]. Cette suppression est réalisée grâce à une source d'antibruit, placée au point focal, qui émet un signal interférant destructivement avec l'onde divergente incriminée. Le dispositif ainsi créé, le puits acoustique, absorbe toute l'énergie convergeant au point focal et permet ainsi de vaincre la limite de diffraction.

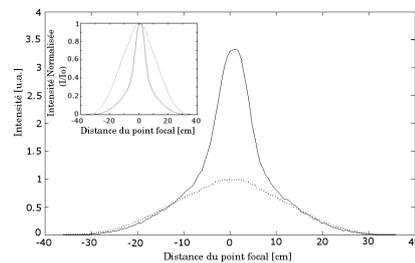


Figure 8: Scan de l'intensité acoustique à l'instant du collapse dans la salle B grâce à un MRT composé de 42 transducteurs (pointillés) et le puits acoustique (trait plein). $f_0 = 500$ Hz et $\Delta f = 1.97f_0$. Pour référence, l'encart présente ces informations normalisées à la même valeur maximale

Dans le cas d'une source d'antibruit rigoureusement ponctuelle, une résolution théorique infinie est atteinte. Dans des cas atteignables expérimentalement, la résolution est uniquement limitée par la taille physique d'émission de la source d'antibruit [17]. Ainsi, quelque soit la longueur d'onde du signal focalisé, il est possible de focaliser efficacement avec une résolution constante, permettant ainsi d'exciter localement une structure de petite taille dans les domaines de basse fréquence. La figure 8 permet de comparer la résolution obtenue grâce aux méthodes classiques de RT et grâce au puits acoustique. Cette mesure montre une largeur de tache focale bien inférieure à la demi longueur d'onde grâce à l'utilisation du puits acoustique : pour une longueur d'onde de 63 cm, la tache focale obtenue grâce au puits acoustique présente une largeur à mi-hauteur de 8.9 cm, soit plus de 7 fois plus petit que la longueur d'onde dans la salle B. Dans la salle

A, des résultats aussi probants ont été obtenus, cette fois avec une largeur à mi-hauteur de $\frac{\lambda}{5}$. Dans les deux cas, la largeur de tache focale est constante et égale à la largeur physique d'émission de la source d'antibruit utilisée pour réaliser le puits acoustique (voir Figure 9). Par ailleurs, le puits acoustique ne modifie en aucun cas les propriétés temporelles du signal au point focal, n'influant ainsi pas sur la qualité de focalisation temporelle.

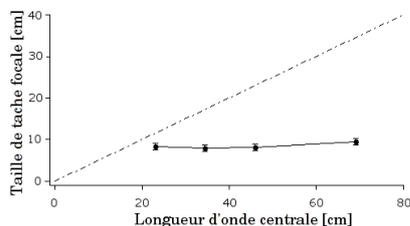


Figure 9: Largeur de la tache focale obtenue dans la salle B grâce au puits acoustique, en fonction de la longueur d'onde centrale données expérimentales (trait plein) et limite de diffraction théorique par RT classique

Conclusions

Cette étude a permis de montrer que les techniques de RT fournissent un outil adéquat, précis, et fiable pour réaliser de la focalisation dans le domaine audible. L'étude des propriétés de focalisation en fonction de l'environnement a permis de montrer que bien qu'adaptatives, ces méthodes donnent des résultats différents en fonction de l'environnement dans lequel le processus de RT est effectué. En effet, la réverbération augmente virtuellement le nombre de transducteurs composant le MRT et permet ainsi une qualité de focalisation spatiale accrue. C'est cette même réverbération qui permet de réaliser une focalisation acoustique précise et efficace à peu de frais, grâce à un seul transducteur. Au contraire, si c'est une qualité de compression temporelle et un niveau de signal à bruit grand, c'est une salle amortie qu'il faut envisager. Les résultats obtenus, conformes aux théories établies, montrent une focalisation très proche des résolutions théoriques, limitées par effets de diffraction. Le puits acoustique, pour la première fois implémenté dans le domaine audible, a permis de vaincre efficacement cette limite et laisse envisager des applications fructueuses dans le domaine de l'excitation de structures, mais surtout dans le domaine de l'imagerie acoustique à super-résolution.

Remerciements

Un merci tout particulier à M. FINK et J. de ROSNY pour leur accueil chaleureux, les fructueuses collaborations et discussions autour de mon travail au LOA. Merci également à J.D. POLACK pour son soutien et ses conseils avisés.

Bibliographie

[1] G. Ribay, J. de Rosny and M. Fink, "Time reversal of noise sources in a reverberation room", *J. Acoust. Soc. Am.* **117**, 2866–2872 (2005).

[2] S. Yon, M. Tanter, and M. Fink, "Sound focusing in rooms: The time-reversal approach", *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 1533–1543 (2003).

[3] M.D. Collins and W.A. Kuperman, "Focalization : Environmental focusing and source localization", *J. Acoust. Soc. Am.* **90**, 1410–1422 (1991).

[4] A.J. Berkhout, "A holographic approach to acoustic control", *J. Audio Eng. Soc.* **36**, 977–995 (1988).

[5] A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis", *J. Acoust. Soc. Am.* **93**, 2764–2778 (1993).

[6] M. Fink, C. Prada, F. Wu, and D. Cassereau, "Self focusing with time-reversal mirror in inhomogeneous media", *Proc. IEEE Ultrason. Symp. Montréal* **2**, 681–686 (1989).

[7] P.M. Morse and K.U. Ingard, *Theoretical acoustics* (New York McGraw-Hill, 1968).

[8] R.P. Porter and A.J. Devaney, "Generalized holography and the inverse source problems", *J. Opt. Soc. Amer.* **72**, 327–330 (1982).

[9] M. Fink, "Time Reversal of Ultrasonic Fields – Part I: Basic principles", *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **39**, 555–566 (1992).

[10] Jackson and Dowling, "Phase-conjugation in underwater acoustics", *J. of the Acous. Soc. of Am.* **89**, 171–181 (1991).

[11] C. Draeger and M. Fink, "One channel time-reversal of elastic waves in a chaotic 2D-silicon cavity", *Phys. Rev. Lett.* **79**, 407–410 (1997).

[12] C. Draeger, J.-C. Aime, and M. Fink, "One-channel time-reversal in chaotic cavities: Experimental results", *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 618–625 (1999).

[13] P. Roux and M. Fink, "Time reversal in a waveguide: Study of the temporal and spatial focusing", *J. Acoust. Soc. Am.* **107**, 2418–2429 (2000).

[14] J. de Rosny and M. Fink, "Overcoming the Diffraction Limit in Wave Physics Using a Time-Reversal Mirror and a Novel Acoustic Sink", *Phys. Rev. Lett.* **89**, 124301-1–124301-4 (2002).

[15] M. Fink, D. Cassereau, A. Derode, C. Prada, P. Roux, M. Tanter, J.L. Thomas, and F. Wu, "Time-reversed acoustics", *Rep. Prog. Phys.* **63**, 1933–1995 (2000).

[16] J. De Rosny, *Milieux réverbérants et réversibilité*, PhD Thesis, Laboratoire Ondes et Acoustique, ESPCI, Université Paris VII (2000).

[17] E. Bavu, C. Besnainou, V. Gibiat, J. de Rosny and M. Fink, "Subwavelength Sound Focusing using a Time-Reversal Acoustic Sink", submitted to *J. Acoust. Soc. Am.* on 28/03/2006.