



## Utilisation d'un laser femtoseconde comme source acoustique en vue d'applications à l'acoustique sous-marine

R. Guillermin<sup>a</sup>, J.-P. Sessarego<sup>a</sup>, A. Jarnac<sup>b</sup>, A. Houard<sup>b</sup>, Y. Brelet<sup>b</sup>, J. Carbonnel<sup>b</sup>, Y.-B. André<sup>b</sup>, A. Mysyrowicz<sup>b</sup> et D. Fattaccioli<sup>c</sup>

<sup>a</sup>LMA/CNRS, 31 chemin Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20, France

<sup>b</sup>LOA, ENSTA Paris-Tech, Ecole Polytechnique, CNRS, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France

<sup>c</sup>DGA Techniques Navales, Avenue de la Tour Royale, BP 40915, 83050 Toulon Cedex, France

guillermin@lma.cnrs-mrs.fr

Ce travail concerne la génération de source acoustique dans l'eau à l'aide d'un laser de très haute énergie, en vue d'applications à l'acoustique sous-marine (génération d'une source sonar déportée,...). Dans cette étude expérimentale, un laser femtoseconde a été utilisé pour générer une source acoustique en laboratoire dans une grande cuve équipée d'hydrophones. Le laser femtoseconde ENSTA-Mobile Ti :Saphir a été utilisé. Le faisceau laser a été focalisé dans l'eau à l'aide d'une lentille optique. Le filament plasma qui se forme au point de focalisation constitue une source acoustique étendue que nous avons caractérisée à l'aide de deux hydrophones couvrant une bande fréquentielle totale de 50 kHz à 20 MHz.

## 1 Introduction

Ce travail concerne la génération de source acoustique dans l'eau à l'aide d'un laser de très haute énergie, en vue d'applications à l'acoustique sous-marine (génération d'une source sonar déportée,...). Les premiers travaux concernant l'utilisation de sources lasers pour générer une onde acoustique dans l'eau ont été initiés dans les années 80 par l'Union Soviétique puis par les Etats-Unis [1, 2]. Plus récemment, Jones and al. [3, 4] ont développé de nouvelles techniques en vue d'utiliser des sources lasers intenses en mer. L'objectif de notre étude est de générer une onde acoustique à l'aide d'un laser de haute énergie dans une cuve instrumentée, afin de caractériser la source acoustique et d'étudier les différents paramètres qui influencent la conversion opto-acoustique. Un laser femtoseconde a été utilisé pour générer une source acoustique en laboratoire dans une grande cuve ( $L=5\text{m}$ ,  $l=3\text{m}$ ,  $h=2,5\text{m}$ ) équipée d'hydrophones. Le laser femtoseconde ENSTA-Mobile Ti :Saphir a été utilisé. Le faisceau laser est focalisé dans l'eau à l'aide d'une lentille optique. Dans la zone focale, il y a génération d'un filament plasma [5, 6, 7, 8] (phénomène de filamentation) qui donne lieu à la création d'ondes de choc acoustiques. Le filament plasma constitue ainsi une source acoustique étendue que nous avons caractérisée à l'aide de deux hydrophones. Les niveaux acoustiques maximum atteints sur les hydrophones sont de l'ordre de 160 dB à 1 m. Les diagrammes de directivité de la source acoustique ont également été mesurés dans un plan contenant le filament, pour différentes fréquences. Enfin, nous avons fait varier différents paramètres ajustables du laser (énergie émise, durée des impulsions) afin de déterminer leur influence sur la source acoustique générée.

## 2 Dispositif expérimental

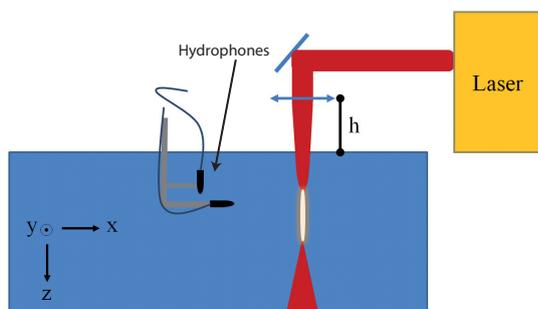
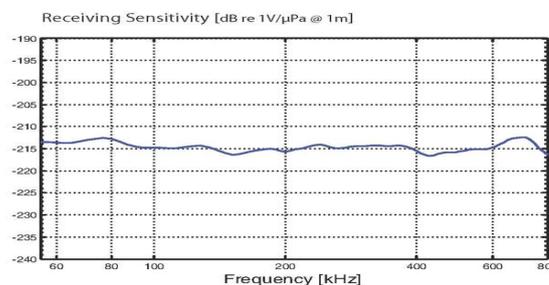


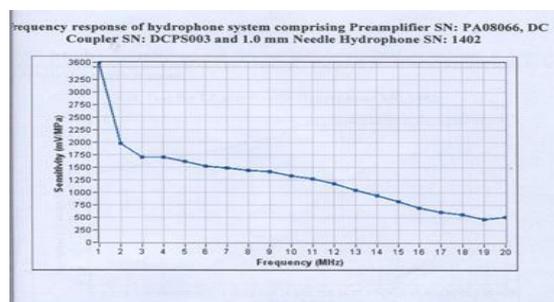
FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental

L'expérimentation a été menée dans la grande cuve océanique du LMA ( $L=5\text{m}$ ,  $l=3\text{m}$ ,  $h=2,5\text{m}$ ). Cette cuve est

équipée de chariots motorisés sur lesquels sont montés des hydrophones permettant des déplacements fins (précision 0,1 mm) suivant les 3 axes X,Y et Z. Le laser femtoseconde du LOA (Laboratoire d'Optique Appliquée) l'ENSTA-Mobile Ti :Saphir a été utilisé afin de générer une source acoustique dans l'eau. Ce laser peut délivrer des impulsions d'énergie maximale 300 mJ pour des impulsions de durée minimale de l'ordre de 50 fs ( $50.10^{-15}$  s) à 800 nm de longueur d'onde, ce qui permet d'atteindre des puissances de plusieurs TW. Le dispositif expérimental est décrit sur la Figure 1. Le faisceau laser est dévié afin de pénétrer dans la cuve perpendiculairement à la surface de l'eau. le faisceau peut être focalisé à différentes profondeurs (de 20 cm à 50 cm). Deux hydrophones ont été utilisés afin de mesurer le signal acoustique, un hydrophone fonctionnant dans la gamme des hautes fréquences et un autre dans la gamme des basses fréquences afin de couvrir une bande totale de 50 kHz jusqu'à 20 MHz. L'hydrophone hautes fréquences est un hydrophone aiguille Acoustic Precision de type PVDF. L'hydrophone basses fréquences est un hydrophone Reson TC4035. Les caractéristiques de ces hydrophones sont données sur la Figure 2.



(a)



(b)

FIGURE 2 – Réponse fréquentielle des hydrophones. (a) : Reson TC4035, (b) hydrophone aiguille Acoustic Precision

### 3 Etude des caractéristiques du signal acoustique mesuré

#### 3.1 Caractéristiques fréquentielles

Le signal acoustique engendré par le laser a été mesuré avec les deux hydrophones. Sur la Figure 3 est représenté le signal temporel acoustique mesuré par l'hydrophone hautes fréquences (HF) ainsi que son spectre.

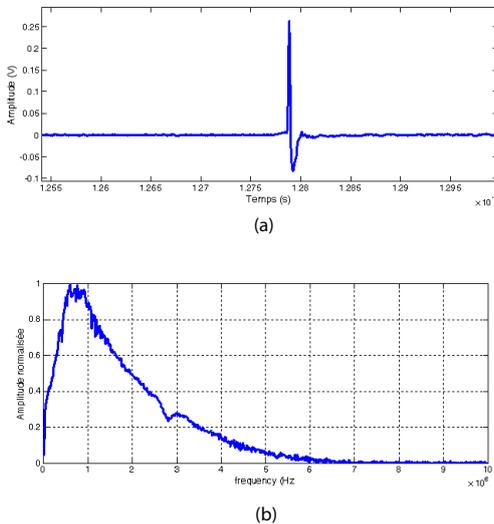


FIGURE 3 – Signal reçu avec l'hydrophone HF (Acoustic Precision)  
(a) : signal temporel, (b) : spectre

Nous pouvons observer sur cette figure que même si l'hydrophone utilisé est très large bande (voir Fig. 2b) il n'y a pas d'énergie acoustique mesurée au delà de 7 MHz. Les mêmes mesures sont effectuées avec l'hydrophone basses fréquences (BF). Les résultats sont représentés sur la Figure 4.

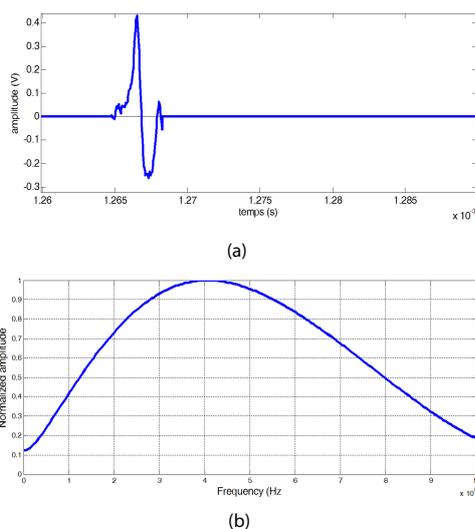


FIGURE 4 – Signal reçu avec l'hydrophone BF (Reson).  
(a) : signal temporel, (b) : spectre

#### 3.2 Diagrammes de directivité

Les diagrammes de directivité de la source acoustique générée par le filament laser ont été mesurés dans un plan contenant le filament. Nous avons vérifié que dans un plan perpendiculaire au filament le diagramme de directivité est omnidirectionnel. Pour l'hydrophone BF et pour la lentille de 200 mm de focale, les résultats sont donnés sur la Figure 5a. On note que pour les fréquences inférieures à 200 kHz, les diagrammes présentent une forte dissymétrie. Au delà de 200 kHz, le faisceau devient symétrique. Les diagrammes obtenus avec l'hydrophone HF sont présentés sur la Figure 5b. Dans ce cas, nous observons un décalage angulaire de 1 à 2 degrés. Ce décalage peut être attribué à une erreur de positionnement du dispositif mécanique mais les diagrammes sont symétriques. Le même type de mesures a été réalisé avec la lentille de focale 500 mm. Les diagrammes mesurés sont représentés sur la Figure 6.

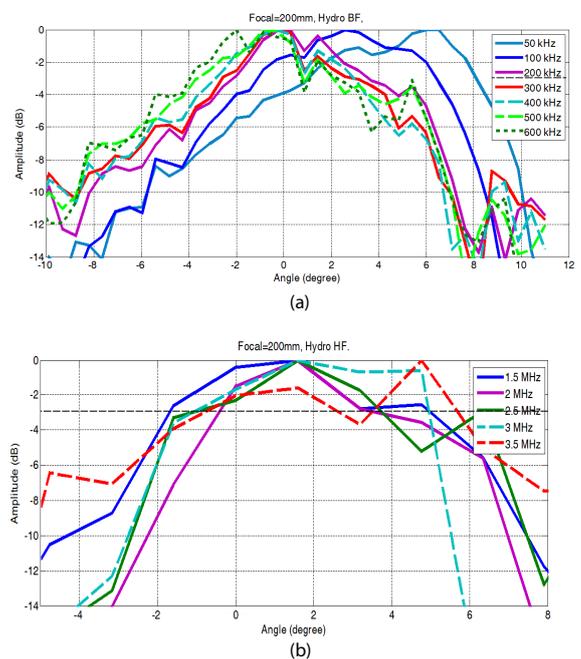


FIGURE 5 – Diagrammes de directivité dans un plan contenant le filament laser, pour une lentille de focale 200 mm. (a) : hydrophone BF, (b) : hydrophone HF

#### 3.3 Influence de la durée et de l'énergie de l'impulsion laser

Nous avons étudié l'influence de l'énergie et de la durée de l'impulsion laser émise sur le signal acoustique enregistré. L'objectif est de choisir les paramètres de l'impulsion laser qui permettent d'obtenir la plus forte énergie acoustique dans la bande mesurée. Les résultats sont présentés sur la Figure 7. A faible énergie (3 mJ), l'amplitude du signal acoustique mesuré augmente avec la durée de l'impulsion laser. Il semble toutefois, y avoir un effet de saturation pour de longues durées d'impulsion laser. A forte énergie (290 mJ) nous n'observons pas d'effet de la durée de l'impulsion laser sur le niveau acoustique enregistré.

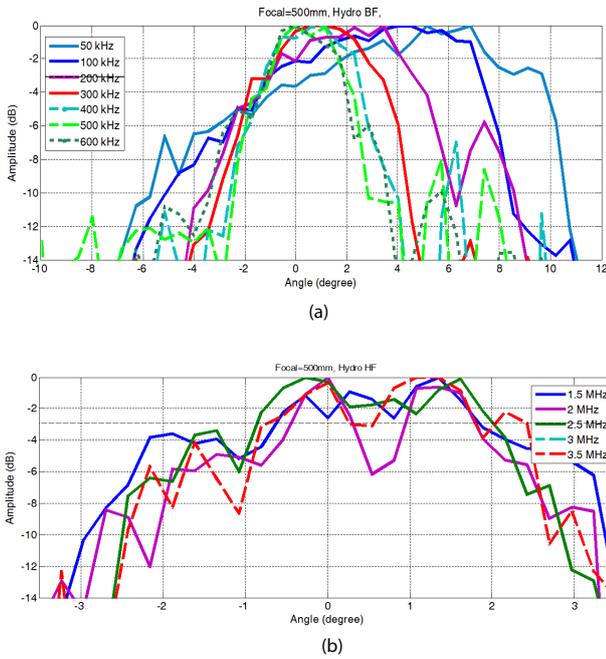


FIGURE 6 – Diagrammes de directivité dans un plan contenant le filament laser, pour une lentille de focale 500 mm. (a) : hydrophone BF, (b) : hydrophone HF

### 3.4 Evolution de l’amplitude en fonction de la distance à la source

Nous avons mesuré l’évolution de l’amplitude des signaux acoustiques enregistrés sur les deux hydrophones en fonction de la distance à la source. Les résultats sont présentés sur la Figure 8. Nous observons que mis à part pour les très faibles distances, le champ acoustique suit bien une loi de décroissance classique en  $1/r$  (si  $r$  est la distance à la source) [9].

## 4 Conclusion

Dans cette étude, nous avons montré qu’un laser femtoseconde peut être utilisé comme source acoustique en vue d’applications à l’acoustique sous-marine. Le niveau acoustique enregistré avec un laser de 800 nm de longueur d’onde est de l’ordre de 160 dB Ref  $1 \mu Pa$  à 1 m. La source acoustique ainsi générée est très large bande (plusieurs décades). Concernant le diagramme de directivité, pour les fréquences inférieures à 200 kHz, on constate une asymétrie des diagrammes. Cette asymétrie est plus marquée pour la lentille de focale 500 mm que pour la focale 200 mm et n’est plus présente à hautes fréquences ( $>300$  kHz). D’autre part nous avons étudié l’influence de différents paramètres du laser comme la durée de l’impulsion ou l’énergie émise sur le signal acoustique. Pour une énergie de l’impulsion laser donnée, la conversion photo-acoustique est plus efficace avec des impulsions lasers longues. Différentes pistes demeurent à étudier afin d’améliorer l’efficacité de la source acoustique (augmenter le niveau). Les premiers tests en laboratoire ont montré que le niveau acoustique mesuré peut être augmenté de plus de 20 dB en présence de particules minérales dans l’eau. D’autre part, nous envisageons également de travailler avec un laser de longueur d’onde 400 nm, car pour cette longueur d’onde l’absorption des ondes optiques dans l’eau

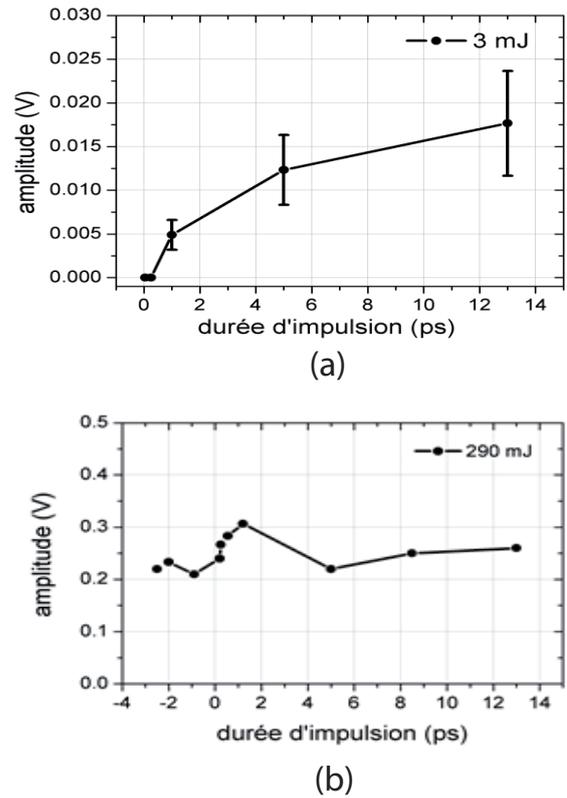


FIGURE 7 – Amplitude du signal acoustique mesuré en fonction de la durée de l’impulsion laser. (a) pour des faibles énergies laser (3mJ), (b) pour de fortes énergies laser (290 mJ).

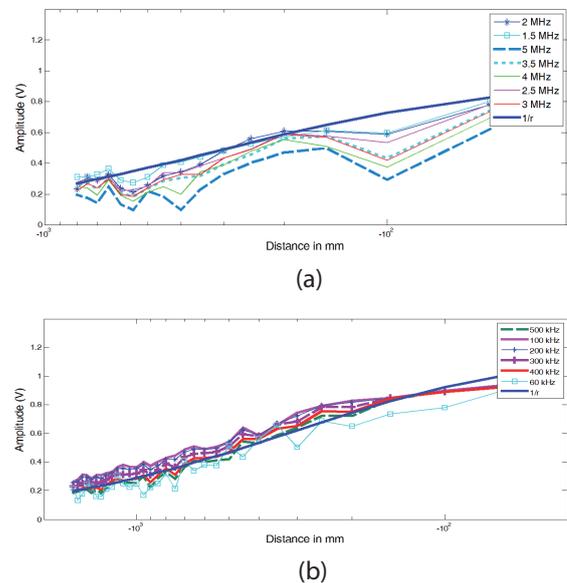


FIGURE 8 – Evolution de l’amplitude du signal acoustique en fonction de la distance à la source. (a) : hydrophone HF, (b) : hydrophone BF

est moins importante qu’à 800 nm.

## Remerciements

Cette étude a été financée par le Ministère Français de la Défense via la DGA/TN.

## Références

- [1] A.D. Pierce, H.A. Hsieh, Underwater sound beams created by airborne laser systems, *ICA Associated symposium on Underwater Acoustics, Halifax (Canada)*, pp. 595-602 (1986).
- [2] N. P. Chotiros, Underwater sound generation by a high-intensity laser pulse, *The Journal of the Acoustical Society of America* **78**, S26 (1985).
- [3] T.G. Jones, A.C. Ting, J. Penano, P. Strangle, L.D. Bibee, Remote underwater intense laser acoustic source, *J. Acoust. Soc. Am.* **121**, 3059-3059 (2007).
- [4] T.G. Jones, M. Hornstein, A.C. Ting, D. Gordon, Z. Wilkes, Characterization of underwater acoustic source for Navy applications, *J. Acoust. Soc. Am.* **125**, 2556-2556 (2009).
- [5] K.A. Naugolnykh, S.V.Egerev, I.B. Esipov, and K.A. Matveev, Nonlinear propagation of laser generated sound pulses in a water and granular medium, *J. Acoust. Soc. Am.* **106**, 3135-3142 (1999).
- [6] Vogel, S. Busch and U. Parlitz, Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water, *J. Acoust. Soc. Am.* **100**, 148-165 (1996).
- [7] T.G. Jones, J. Brun, D. Bibee, C. Manka, A. Landsberg, and D. Tam, Laser-generated shocks and bubbles as laboratory-scale models of underwater explosions, *Shock and Vibration*, **10**, 147-157 (2003).
- [8] C. B. Schaffer, N. Nishimura, E. N. Glezer, AM.-T. Kim, and E. Mazur, Dynamics of femtosecond laser-induced breakdown in water from femtoseconds to microseconds, *Optics Express*, **10** (2002).
- [9] Jason R. McGhee, Investigation of the Acoustic Source Characteristics of High Energy Laser Pulses, Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California (2008).