

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Mesure d'ondes de choc acoustique: influence de la réponse des microphones

Sébastien Ollivier¹, Edouard Salze¹, Petr Yuldashev^{1,2}, Mikhaïl Averiyarov²

¹ Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, 36 Av Guy De Collongue F-69134 Ecully Cedex, sebastien.ollivier@ec-lyon.fr

² Department of Acoustics, MSU, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Fédération de Russie.

L'étude expérimentale de la propagation d'ondes de choc acoustique dans l'air peut se faire en laboratoire en utilisant des sources à arc électrique. Le claquage d'un arc entre deux électrodes soumises à une différence de potentiel de 15 kV produit un échauffement brutal qui engendre une surpression. En raison de la propagation non linéaire, à quelques centimètres de la source des ondes dites "en N " d'une durée de quelques dizaines de microsecondes sont obtenues. L'étude théorique de ces ondes a permis de déterminer que le temps de montée du choc est de l'ordre du dixième de microseconde. Le spectre s'étend de 10 kHz à plusieurs centaines de kHz, sur une gamme dynamique de l'ordre de 60 dB. Le même type d'ondes est obtenu avec des projectiles supersoniques de petite taille. La mesure de ce type d'ondes est généralement réalisée à l'aide de microphones capacitifs dont la bande passante limitée ne permet pas d'obtenir une image fidèle de l'onde de pression. Ce type de microphone ne permet notamment pas de mesurer correctement la structure des chocs (hautes fréquences), mais l'analyse comparée de mesures et de prédictions théorique permet néanmoins de déterminer l'onde de pression. Dans cette présentation, en comparant mesures et modélisation, nous mettrons en évidence l'influence de la réponse de microphones 1/4" et 1/8" sur la mesure d'ondes en N de courte durée. On s'intéressera notamment à la réponse en fonction de l'angle d'incidence de l'onde.

1 Introduction

Certaines applications en acoustique nécessitent de mesurer des ondes de pression en hautes fréquences, et notamment : la simulation expérimentale de la propagation à échelle réduite (en acoustique des salles ou urbaine sur maquettes, ou pour la simulation de la propagation aérienne en laboratoire) ; l'acoustique non linéaire (ondes de chocs générées par des sources de forte amplitude) ; l'aéroacoustique (chocs générés par des jets supersoniques, *buzz saw noise*). Pour ces applications le choix du micro s'avère critique. Or actuellement pour les mesures large bande les microphones les plus adaptés sont les microphones capacitifs 1/8". En acoustique non linéaire il s'avère que les ondes de choc ont un temps de montée très court. L'influence de la réponse du micro est donc primordiale et le résultat d'une mesure d'onde de choc peut contenir autant d'information sur le fonctionnement du microphone que sur le phénomène physique que l'on cherche à étudier. Il convient donc de bien connaître les limites de fonctionnement de ces microphones en hautes fréquences, à la limite de leur bande passante. Dans cette étude, nous nous intéressons d'abord à montrer les conséquences de la réponse finie des microphones sur la mesure d'ondes de choc en N . Ensuite nous présentons des résultats expérimentaux montrant l'influence du montage des microphones sur leur réponse.

2 Caractérisation expérimentale d'une onde en N de courte durée

Pour étudier en laboratoire la propagation d'ondes sonores de durée finie, de fort niveau sonore, et/ou dont le spectre est étendu sur plusieurs décades, il est courant d'utiliser des sources impulsives à arc électrique ou des lasers focalisés. Le principe étant d'utiliser comme source sonore l'onde de pression générée au moment de la formation d'une étincelle. Les ondes de pression générées sont appelées *ondes en N* en raison de leur forme. La figure 1 est un exemple d'onde de pression générée par une source à étincelle électrique et mesurée par un microphone Brüel & Kjær 1/8" (monté dans un baffle afin de limiter les effets de diffraction). Ce type d'ondes est typique du champ de pression que l'on peut mesurer à distance d'une source acoustique de très fort niveau : en raison de la propagation non linéaire, l'onde acoustique s'est déformée jusqu'à la formation de chocs. Si l'on s'intéresse à l'étude expérimentale de la propagation non linéaire d'ondes de choc acoustiques, les paramètres importants à mesurer sont : le niveau de pression maximum P_{max} , la durée de l'onde (on s'intéresse ici à la demi durée appelée T), ainsi que le temps de montée du choc classiquement défini comme la durée nécessaire à l'augmentation de la pression de $0.1P_{max}$ à $0.9P_{max}$. Tous ces paramètres varient avec la distance à la source r : la pression diminue par l'atténuation visco-thermique, par la propagation non linéaire, et par

l'atténuation géométrique; la durée de l'onde augmente avec la distance en raison de la propagation non linéaire; et le temps de montée du choc augmente si les effets dissipatifs ont plus d'influence que les effets non linéaires.

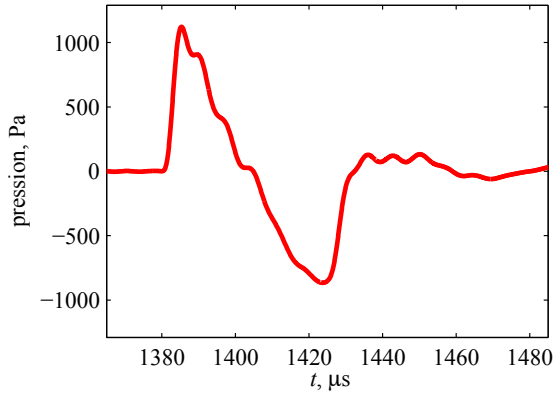


FIG. 1: Onde en N mesurée par un microphone 1/8"

2.1 Dispositif expérimental

Afin d'étudier l'évolution de ces paramètres avec la distance et les comparer aux prédictions théoriques basée sur la modélisation de la propagation à l'aide d'une équation de Burgers modifiée [1], un dispositif expérimental schématisé sur la figure 2 a été utilisé. Il est constitué d'une source à arc électrique (1), d'un baffle (4) dans lequel des microphones 1/4" et 1/8" peuvent être placés. La distance r entre la source et les microphones peut-être modifiée. Les autres éléments servent pour une mesure optique du front d'onde [2]. Les microphones sont des Brüel & Kjaer type 4138 (1/8") ou 4939 (1/4").

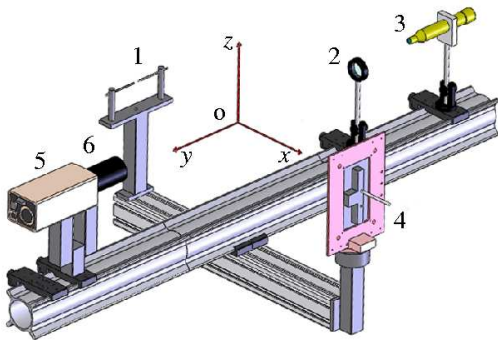


FIG. 2: Schéma du dispositif expérimental.

2.2 Résultats

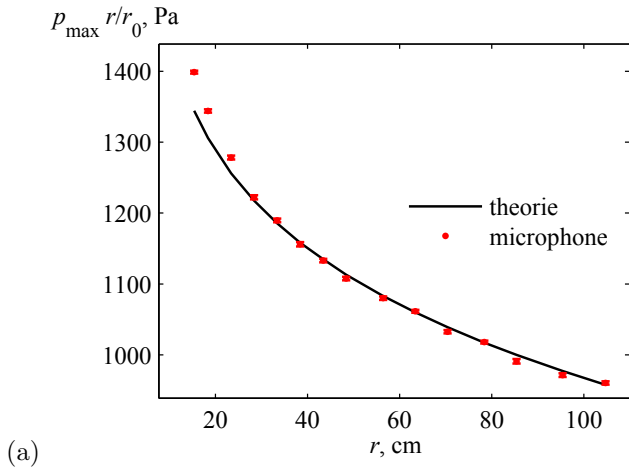
La mesure d'ondes en N générées par la source à étincelle pour des distances croissantes conduit aux résultats de la figure 3. Les résultats expérimentaux déduits de la sortie de la chaîne microphonique sont tracés sur les figures 3a-c. On peut constater que la mesure du niveau de pression et de la demi-durée de

l'onde sont en accord avec les résultats de la simulation numérique de la propagation non linéaire obtenue en résolvant une équation de Burgers modifiée. En revanche, les résultats pour le temps de montée déduit de la sortie de la chaîne microphonique ne correspondent pas du tout aux prédictions du modèle de propagation : le temps de montée semble largement surestimé. La limite en hautes fréquences de la réponse des microphones 1/8" étant de l'ordre de 140 kHz, nous avons complété ces mesures par des mesures optiques (ombroscopie) afin d'augmenter la résolution de la mesure du choc [2]. Le résultat de cette mesure est tracé en bleu sur la figure 3. Il apparaît clairement que la mesure microphonique surestime largement le temps de montée de l'onde, la raison étant la bande passante limitée du microphone en hautes fréquences.

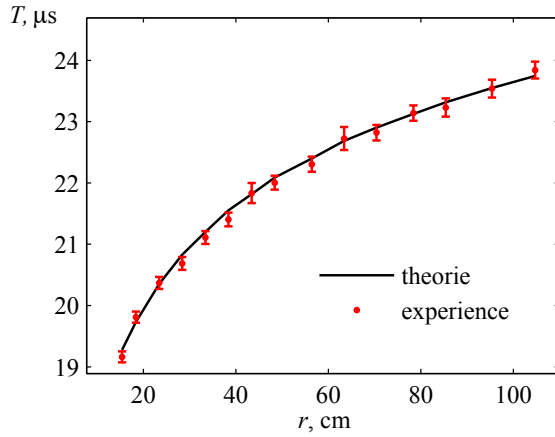
3 Influence de la réponse des microphone

3.1 Temps de montée

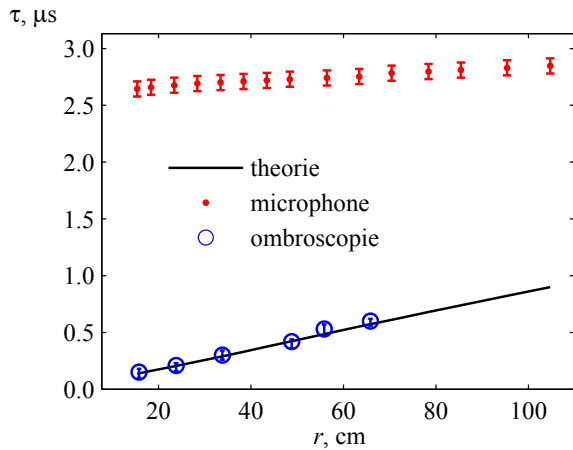
Afin de simuler l'influence de la bande passante limitée des microphones sur la mesure du temps de montée, on peut comparer le temps de montée estimé et réel pour des ondes en N idéales de durée et de niveau constant qui seraient mesurées par un microphone dont la réponse en amplitude est tracée sur la figure 5.b. On compare par exemple sur la figure 5.a le cas d'une onde en N de temps de montée de $0.57 \mu\text{s}$ (tracée en bleu) et la sortie du microphone (en rouge). On observe une forme d'onde similaire aux formes expérimentales, mais le temps de montée est largement surestimé. En répétant l'opération pour des temps de montée variables on obtient la courbe de la figure 5.c qui montre que l'on ne peut pas mesurer correctement le choc d'une onde en N si le temps de montée est inférieur à $3 \mu\text{s}$. D'après les résultats précédents, on peut déduire que la réponse des microphone permet de mesurer correctement les "basses fréquences" de l'onde en N car le niveau de pression maximum et la durée de l'onde semblent correctement estimés, en revanche il faut être très prudent en ce qui concerne l'analyse du temps de montée, et plus généralement l'analyse des hautes fréquences. Ce résultat est confirmé si l'on compare les formes d'onde (figure 4a) et les spectres (figure 4b) d'une part prédits par la modélisation de la propagation, avec d'autre part ceux déduit de la mesure microphonique : l'amplitude du pic, la durée de l'onde et les basses fréquences sont correctement mesurées, tandis que le temps de montée est surestimé et le spectre aux fréquences au-delà de 40 kHz est sous-estimé.



(a)



(b)



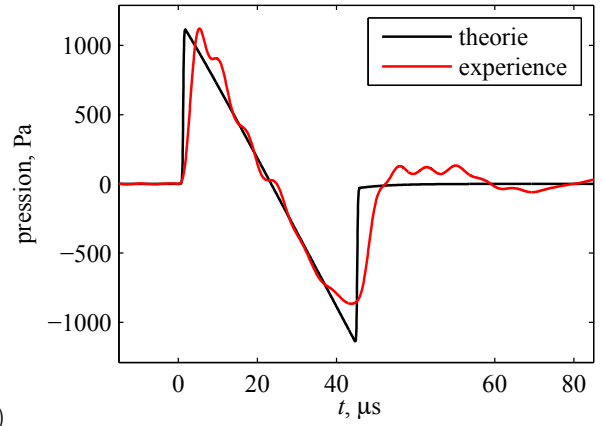
(c)

FIG. 3: Comparaison de mesures et de prédictions théoriques en fonction de la distance à la source r .

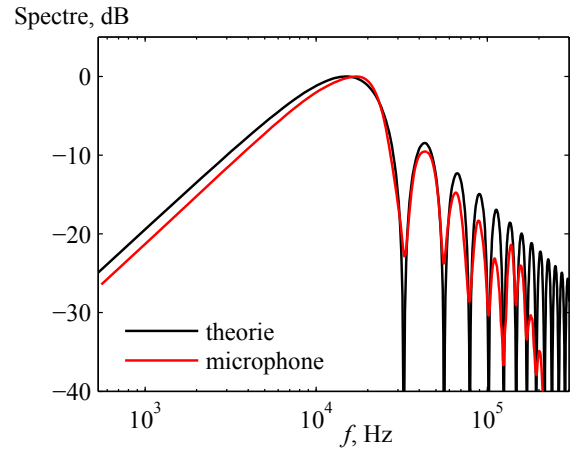
Ligne noire : modèle ; points rouges : mesure microphonique. (a) Niveau de pression maximum P_{max} normalisé par le niveau de pression mesuré à $r_0 = 15$ cm de la source ; (b) demi durée de l'onde T ; (c) temps de montée du choc (cercles bleus : mesure optique par ombroscopie [2]).

3.2 Influence du montage

Si l'on effectue la mesure d'ondes en N pour différents montages du microphone, les formes d'ondes sont différentes. Ceci est illustré par la figure 6 où l'on compare les formes d'ondes déduites de la mesure par un microphone 1/8" d'une onde en N en incidence normale pour trois montages différents : microphone monté sans grille de protection dans un baffle pour rejeter la dif-



(a)

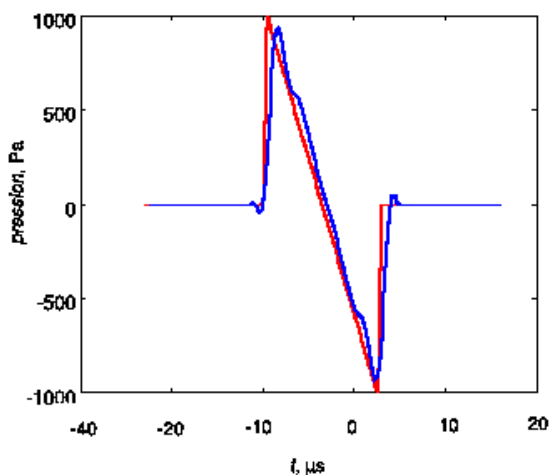


(b)

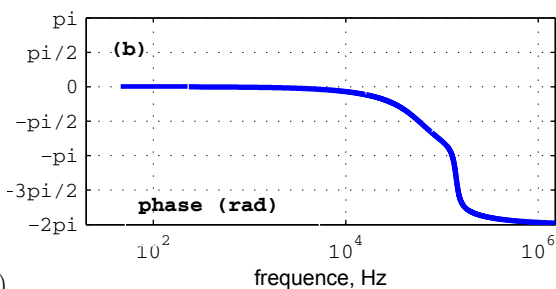
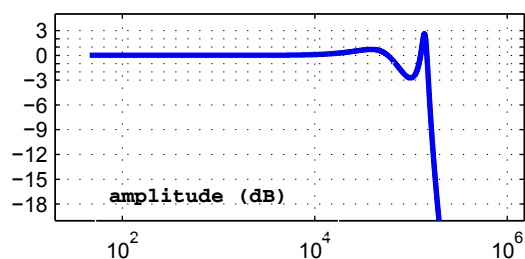
FIG. 4: Comparaison de la forme d'onde (a) et du spectre (b) estimés à partir de la modélisation de la propagation (noir) et obtenus à partir de la sortie de la chaîne microphonique (rouge).

fraction, microphone sans baffle et sans grille de protection, et sans baffle mais avec grille de protection montée. On constate que le montage dans un baffle sans grille de protection permet d'obtenir la forme d'onde la plus symétrique et se rapprochant le plus d'une onde en N . Les autres montages ont une forme moins symétrique et présentent un pic de surpression après le choc arrière. C'est la courbe de réponse en hautes fréquences du microphone qui est principalement responsable de la forme que prend l'onde au niveau.

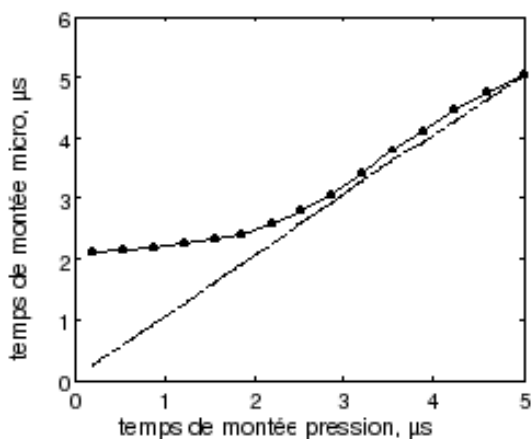
Il apparaît finalement que le signal microphonique contient autant d'information sur les limites du microphone que sur l'onde de pression. Si le spectre de l'onde de pression est suffisamment bien connu par ailleurs, il est alors possible d'estimer la réponse en fréquence du microphone par comparaison du spectre de pression et du spectre de la sortie de la chaîne microphonique. L'intérêt de cette approche "champ libre" est qu'elle permet d'estimer la réponse en fréquence "in situ" pour différents types de montage des microphones. La figure 7 compare la réponse fréquentielle en incidence normale d'un microphone Brüel & Kjær 1/8" type 4138 estimée par la mesure microphonique de l'onde en N lorsque le micro est bafflé et sans grille de protection (noir) avec la réponse fréquentielle issue de la calibration par le fabricant en utilisant la méthode de la grille électrostatique (bleu). Ces deux configurations sont en effet similaires puisqu'il n'y a pas d'influence de la grille de protection



(a)



(b)



(c)

FIG. 5: (a) Onde en N idéale de temps de montée $0.57 \mu s$ (rouge) et sortie d'un microphone (bleu) qui aurait la courbe de réponse tracée en (b). (c) Temps de montée estimé à partir de la sortie du microphone de réponse (b) en fonction du temps de montée de l'onde de pression.

et la diffraction sur les bords du microphone est limitée. On remarque un bon accord entre ces deux estimations. La même démarche est utilisée pour évaluer l'in-

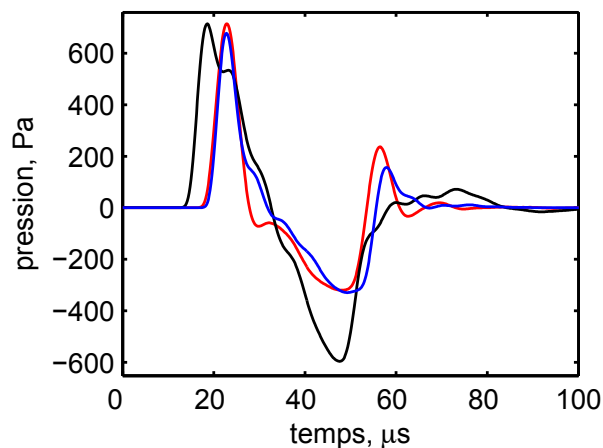


FIG. 6: Forme de l'onde mesurée par un microphone $1/8''$ en incidence normale pour trois montages différents. En noir : monté sans grille de protection dans un baffle pour rejeter la diffraction; en bleu : sans baffle, sans grille; en rouge : sans baffle, avec grille de protection.

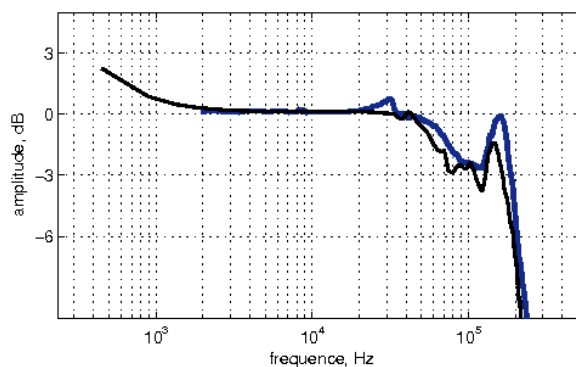


FIG. 7: Réponse fréquentielle d'un microphone Brüel & Kjær $1/8''$ type 4138 estimée par la mesure microphonique de l'onde en N lorsque le micro est bafflé et sans grille (noir), comparée à la réponse fréquentielle issue de la calibration par le fabricant en utilisant la méthode de la grille électrostatique (bleu).

fluence du montage des microphones. Les résultats sont présentés sur la figure 8. Si l'on compare les réponses obtenues pour le microphone monté sans grille dans un baffle (noir) et les deux montages "non bafflé", on constate jusqu'aux environs 10 kHz un gain de 6 dB lié au doublement de la pression sur le baffle, et une courbe de réponse plus plate avec baffle (jusqu'à 40 kHz) alors que les réponses des montages "non bafflé" augmentent dès 10 kHz en raison de la diffraction sur les bords du micro (en bleu) ou sur la grille de protection (en rouge). Ces réponses sont en accord qualitatif avec les données fournies par le fabricant [3]. Le choix d'un montage "bafflé" ou "non bafflé" revient donc à choisir entre une courbe plate jusqu'à des fréquences plus élevées, et une meilleure sensibilité en hautes fréquences, celle-ci étant obtenue au détriment du respect de la forme de l'onde qui n'a alors plus la forme d'un N .

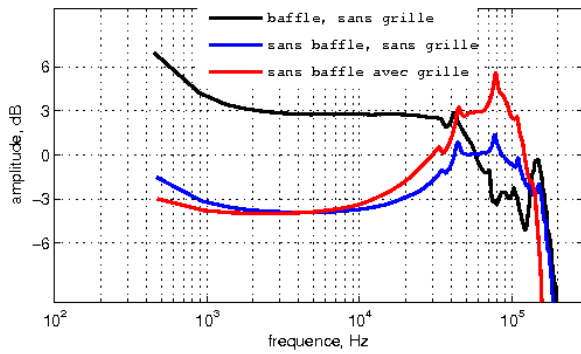


FIG. 8: Réponses fréquentielles d'un microphone Brüel & Kjær 1/8" type 4138 obtenues pour différents montages : lorsque le microphone est bafflé et sans grille (noir), sans baffle et sans grille (bleu), sans baffle avec grille (rouge).

4 Conclusion

La mesure d'ondes de choc acoustique dites "en N " a mis en évidence la difficulté de mesurer des variations brutales de pression telles que mesurées en acoustique non linéaire. La bande passante limitée des microphones actuellement disponibles ne permet pas de mesurer correctement le temps de montée de chocs faibles, celui-ci étant alors surestimé. De plus, nous avons montré que la réponse des microphones est largement modifiée dès 10 kHz en fonction du type de montage du microphone. Il convient donc d'être très prudent dans l'analyse de chocs acoustiques, qu'ils soient générés par des sources impulsionnelles de forte amplitude, par des jets supersoniques, ou par des aubes tournant à grande vitesse. Au cours de l'exposé nous compléterons l'analyse par la présentation de résultats en incidence non normale ainsi que pour des microphones 1/4".

Références

- [1] Yuldashev P.V., Aver'yanov M.V., Khokhlova V.A., Ollivier S., Blanc-Benon Ph., "Nonlinear spherically divergent shock waves propagating in a relaxing medium", *Acoust. Phys.*, 54 (2006).
- [2] Yuldashev P., Aver'yanov M.V., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O., Ollivier S., Blanc-Benon Ph., "Measurement of shock N -waves using optical methods", 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 10-12 Avril 2010.
- [3] Brüel & Kjær, "1/8" pressure-field microphone type 4138 product data", <http://bksv.fr>