

# CFA/VISHNO 2016

## **Interaction non linéaire d'ondes de choc acoustiques au voisinage d'une frontière rigide**

S. Ollivier, C. Desjoux, D. Dragna, T. Castelain, M. Karzova et P.  
Blanc-Benon

LMFA UMR 5509 , Université Claude Bernard Lyon 1, 36 avenue Guy de Collongue,  
69130 Ecully, France  
sebastien.ollivier@ec-lyon.fr



LE MANS

Pour une onde se propageant au voisinage d'une paroi, lorsque le niveau de pression est suffisamment élevé des schémas de réflexion différents du cas linéaire peuvent être observés. C'est le cas en particulier pour la réflexion d'ondes de choc avec un angle d'incidence faible par rapport à une surface lisse. L'interaction onde directe / onde réfléchie peut conduire à la formation d'un pied de Mach et à un schéma de réflexion non spéculaire où l'angle de réflexion diffère de l'angle d'incidence. Pour des ondes de pression impulsives générées par une source à étincelles haute tension, ces phénomènes ont pu être observés expérimentalement en laboratoire à l'aide de méthodes optiques de visualisation du front d'onde (strioscopie Schlieren, interféromètre). Les observations sont en très bon accord avec des simulations numériques directes de la propagation d'ondes de choc basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes. Les interactions non linéaires entre ondes directes et réfléchies pour des surfaces non planes ou rugueuses seront discutées. Les sources à étincelles étant utilisées pour des expériences à échelle réduite, nous étudierons les conditions pour lesquelles ce type d'interaction peut être observé expérimentalement par voie optique ou microphonique, des points de vue physique et métrologique pour différents capteurs.

## 1 Introduction

L'impact d'une onde de choc sur une paroi rigide donne naissance à une onde réfléchie. En fonction de l'angle d'incidence et/ou du niveau de pression incident, plusieurs régimes de réflexion peuvent apparaître : un régime de réflexion dit *régulier* pour lequel l'intersection entre l'onde incidente et l'onde réfléchie se fait sur la paroi, et un régime dit *irrégulier* pour lequel l'intersection entre l'onde incidente et l'onde réfléchie se fait au dessus de la paroi. Un troisième choc, appelé pied de Mach (*Mach stem* en anglais) [1], issu de l'interaction non linéaire, relie l'intersection à la paroi (voir figure 1). La réflexion est alors non spéculaire et les angles incident et réfléchis ne sont pas identiques. Fréquemment observé dans le cas de chocs forts (nombre de Mach  $M$ , défini comme le rapport de la vitesse du choc sur la vitesse de propagation dans le milieu, très supérieur à 1) [2, 3], le phénomène est encore peu étudié dans le cas de chocs faibles (cas faiblement non linéaire pour lequel  $M \approx 1$ ), tels que les chocs acoustiques. Dans ce domaine, Baskar *et al.* [4] ont étudié les phénomènes de transition entre les différents régimes de réflexion dans le cas de chocs acoustiques faibles. La dérivation de la condition limite pour l'équation KZ [5] les a conduit à la définition du paramètre critique  $a$ , déjà introduit par Brio & Hunter [6]. Ce paramètre quantifie le rapport entre les effets non linéaires et les effets de diffraction à proximité de la paroi rigide, il est défini par la relation  $a = \sin \theta_i / \sqrt{2P_a / (\rho c^2)}$ , avec  $\theta_i$ , l'angle d'incidence par rapport à la surface,  $\beta$ , le paramètre non linéaire du milieu,  $P_a$ , l'amplitude de pression acoustique, et  $\rho$  et  $c$  sont respectivement la masse volumique et la célérité des ondes adiabatiques dans le milieu de propagation.

Quatre régimes de réflexion ont été identifiés par Baskar *et al.* dans le cas de la propagation d'ondes planes [4, 7] : a) lorsque  $a > 5$ , le régime de réflexion est linéaire régulier, b) lorsque  $\sqrt{2} < a < 5$ , le régime de réflexion est non linéaire régulier, c) lorsque  $0.4 < a < \sqrt{2}$ , le régime de réflexion est irrégulier, et d) lorsque  $a < 0.4$ , le régime est alors appelé régime de *Von Neumann faible* [2, 4].

L'objet de la présentation au CFA 2016 est l'étude de la propagation d'ondes de choc sphériques à proximité d'une paroi parfaitement rigide, lisse ou rugueuse, expérimentalement et par simulation numérique de la propagation.

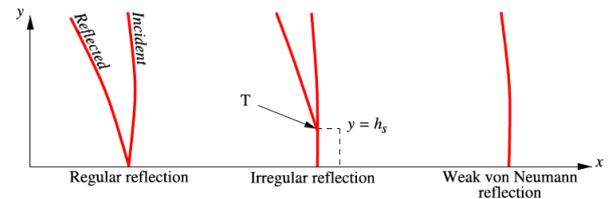


FIGURE 1 – Différents types de réflexion : Réflexion régulière (RR), réflexion irrégulière (IR), réflexion type von Neuman faible (WVN).

## 2 Méthode

Pour observer des réflexions irrégulières d'ondes de choc sur des surfaces, les méthodes classiquement utilisées en acoustique ou en détonique fonctionnent lorsque les ondes sont de durée suffisamment longue par rapport au temps de réponse des capteurs, et lorsque la taille du capteur est petite devant les échelles acoustiques. Dans le cas des expériences en laboratoire, la difficulté vient principalement du fait que les échelles de temps et de longueurs ne sont plus en rapport avec les performances et caractéristiques des capteurs microphoniques. Dans le cas de chocs générés dans l'air à l'aide de sources à arc électrique ou de laser focalisé, les chocs ont une épaisseur de l'ordre de 0.03 à 0.3 mm, et des temps de montée de l'ordre de 0.1 à 1  $\mu\text{s}$ . Les microphones de mesure à condensateur 1/8 de pouce ont une réponse temporelle qui ne permet pas de mesurer des temps de montée inférieurs à 2.5  $\mu\text{s}$ , et la diffraction a une grande influence sur leur réponse à leur limite haute de bande passante. Des capteurs de choc permettent la détection du premier front d'onde mais ne permettent pas non plus une mesure fidèle de la pression.

Une alternative pour la mesure d'ondes de choc de courte durée est l'utilisation de méthodes optiques. Les méthodes optiques permettent de détecter le passage d'ondes de pression lorsque la variation de pression est suffisamment brève et amplitude élevée. L'intérêt des méthodes optiques est principalement leurs résolutions temporelles et spatiales, ainsi que le caractère "non invasif" qui permet de limiter l'erreur de finesse contrairement aux microphones. Pour les mesures d'ondes de choc acoustiques nous utilisons soit une mesure basée sur un interféromètre [8, 9], soit une méthode strioscopique (dite *Schlieren*) [10, 11]. Le principal inconvénient des méthodes optiques est que la pression n'est obtenue, sous certaines hypothèses, qu'après traitement. La mesure d'ondes de choc réfléchies a été effectuée récemment

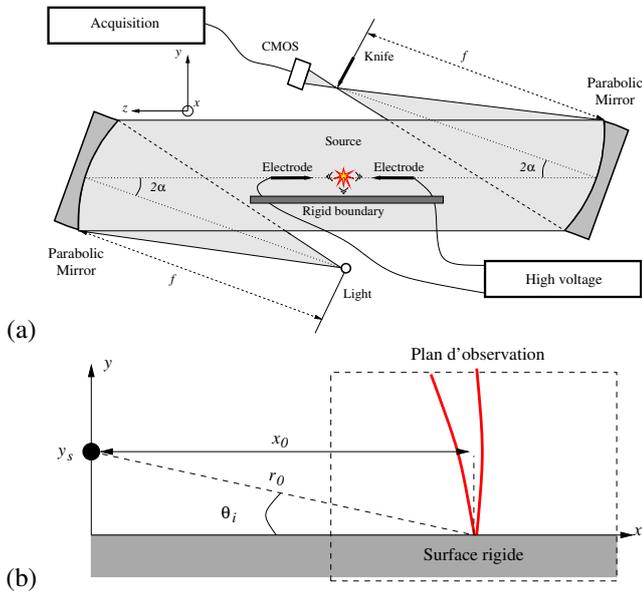


FIGURE 2 – (a) Schéma du montage expérimental ; (b) Définition des coordonnées géométriques (angle d'incidence  $\theta_i$ , altitude de la source  $y_s$ , distance source-point de réflexion  $r_0$ , abscisse du point de réflexion  $x_0$ ).

à l'aide d'un interféromètre [12]. Cela permet d'obtenir la pression acoustique, mais au prix d'un post traitement important. La strioscopie permet d'obtenir une image de la géométrie du front d'onde plus facilement, mais en contrepartie la pression n'est pas directement accessible.

Pour l'étude paramétrique de la réflexion des ondes choc nous avons utilisé la strioscopie afin d'accéder rapidement à la géométrie du front d'onde. Le montage utilisé est un montage dit "en Z" tel que la lumière est traversée par l'onde acoustique entre deux réflexions par des miroirs [13]. Voir le schéma de la figure 2. Les images obtenues ne représentent pas directement la pression mais permettent de localiser les chocs.

En parallèle de l'approche expérimentale, la propagation des ondes de choc au voisinage d'une surface lisse et parfaitement réfléchissante a été simulée en utilisant un code de propagation en deux dimensions basé sur la résolution numérique des équations complètes de Navier-Stokes. Ce code a été implémenté sur carte graphique. La description complète du solveur est présentée en référence [14]. La condition sur la paroi rigide est une condition de non glissement. La source est un dépôt d'énergie Gaussien. Les détails concernant le code et la résolution des équations de propagation sont dans la référence [15]. Pour le cas de la propagation au voisinage d'une surface rugueuse un second code a été développé. Il est basé sur la résolution des équations d'Euler à deux dimensions, la prise en compte de la géométrie non plane de la surface réfléchissante étant prise en compte à l'aide de transformations curvilignes [16].

Les simulations numériques à deux dimensions diffèrent de l'expérience principalement par le caractère implicitement cylindrique de la source ponctuelle pour les simulations à deux dimensions contre une directivité sphérique pour la source impulsionnelle utilisée dans l'expérience. L'étude se limitant à l'analyse locale au voisinage de la zone où l'onde interagit avec la paroi rigide, cette différence a été contournée par le paramétrage de la source. Celle-ci est

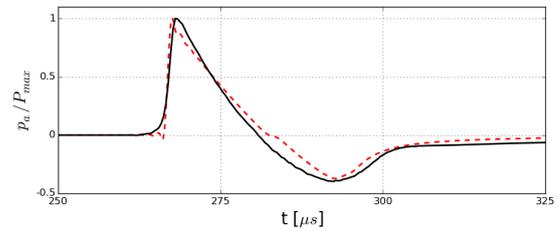


FIGURE 3 – Forme d'onde mesurée avec un interféromètre (trait plein), et forme d'onde numérique (tirets) pour une même distance de propagation (sans paroi).

initialisée de telle sorte que pour une distance correspondant à la distance *source - point de réflexion*, sans la présence de paroi, les ondes simulées et mesurées sont quasiment identiques (figure 3).

### 3 Résultats

Afin d'étudier les conditions d'apparition du pied de Mach et l'évolution de sa hauteur  $h_s$  en fonction du niveau de pression  $P_{max}$  et de la géométrie (altitude source, angle d'incidence), une étude comparée simulations / expériences a d'abord été menée pour valider l'approche, puis une étude paramétrique a été réalisée en exploitant uniquement le modèle numérique. Les résultats détaillés de l'étude dans le cas d'une réflexion sur une surface lisse sont reportés dans la référence [15].

La figure 4 montre une comparaison mesures / simulations numériques pour le cas de la réflexion sur une surface lisse d'une onde en  $N$  pour différentes altitudes de la source (et donc différents angles de réflexion). On constate d'abord un excellent accord entre les simulations numériques et les mesures, particulièrement au voisinage proche de la paroi. Comme attendu les différences entre simulations et observations expérimentales augmentent avec la distance à la paroi en raison des différences entre la propagation des ondes sphériques (expérience) et cylindriques (modèle). Néanmoins, tant que la fenêtre d'observation est limitée à quelques longueurs d'onde, l'accord modèle 2D / expérience est très satisfaisant et permet l'exploitation du modèle pour une étude paramétrique. On observe ensuite différents schémas de réflexion selon l'angle d'incidence, qui dépend de l'altitude de la source  $y_s$ . Lorsque l'angle  $\theta_i$  diminue, on observe l'apparition et l'augmentation d'un pied de Mach. La réflexion n'est alors plus spéculaire et les angles d'incidence et de réflexion diffèrent.

L'étude expérimentale et numérique réalisée pour de nombreuses positions de source a permis d'étudier l'apparition et l'évolution du pied de Mach. La transition de réflexion régulière à irrégulière a été observée pour une valeur du paramètre  $a = \sqrt{2}$ , en accord avec la référence [4]. Il a été mis en évidence que la hauteur du pied de Mach augmente linéairement avec la distance de propagation. La hauteur du pied de Mach atteint l'altitude de la source pour une valeur du paramètre  $a = 0.41$ . Pour  $a < 0.1$ , les ondes directe et réfléchie se confondent et il devient impossible de déterminer une hauteur de pied de Mach. La figure 5 résume les conditions d'apparition du pied de Mach en fonction de l'amplitude de la pression et de l'angle d'incidence par rapport à la paroi. On notera que pour les expériences de

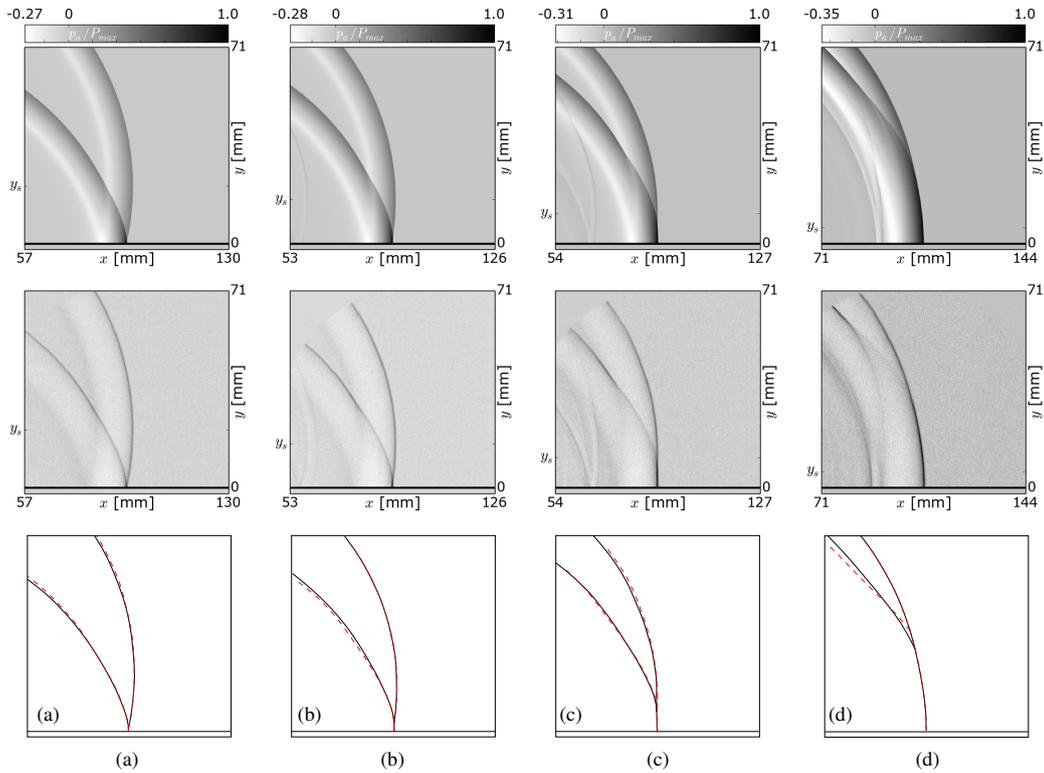


FIGURE 4 – Comparaison simulations / expériences pour différentes valeurs du paramètre  $a$  : (a)  $y_s = 21$  mm,  $a = 0.83$ , (b)  $y_s = 16$  mm,  $a = 0.66$ , (c)  $y_s = 11$  mm,  $a = 0.45$ , and (d)  $y_s = 6$  mm,  $a = 0.22$ . Ligne supérieure : champ de pression normalisé  $p_a(x, y)/P_{max}$  ; Ligne du milieu : images Schlieren ; Ligne du bas : comparaison de la position du choc (trait continu : simulations numériques ; tirets : mesures optiques)

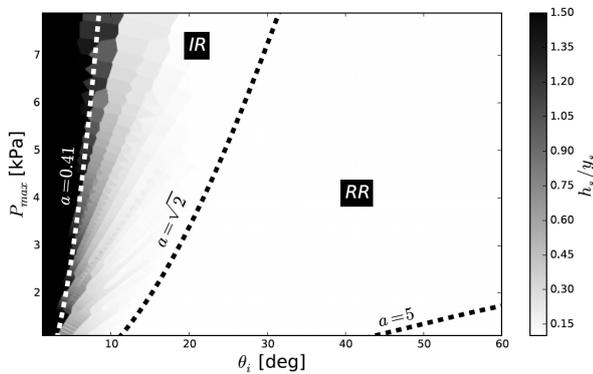


FIGURE 5 – Cartographie de la hauteur du pied de Mach normalisé par la hauteur de la source en fonction de l'angle d'incidence et du niveau du pic de pression.

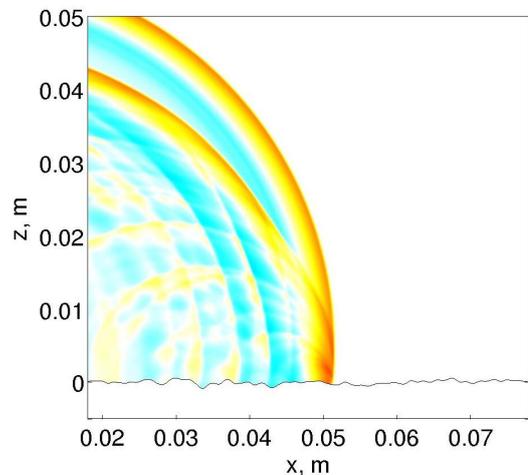


FIGURE 6 – Exemple de simulation de la réflexion d'une onde de choc sur une surface rugueuse.

propagation basées sur une source à étincelle ou un laser focalisé, il faut s'attendre à des réflexions irrégulières et la formation possible d'un pied de Mach pour des angles d'incidence  $\theta_i$  inférieurs à  $15^\circ$ . L'étude a par ailleurs permis d'établir que pour la réflexion de l'onde de choc sphérique, la hauteur du pied de Mach  $h_s$  est proportionnelle à la hauteur de la source  $y_s$  et à  $a^{-2}$  :  $h_s/y_s = \xi/a^2$ , où  $\xi$  est une constante.

Dans le cas de la surface rugueuse, on observe des schémas de réflexion plus complexes en raison des contributions diffractées (figure 6). On observe également une diminution de l'amplitude du choc et, pour une position de source donnée, la modification de la distance d'apparition du pied de Mach. Pour une altitude de source identique, la hauteur du pied de Mach est plus courte pour une paroi

rugueuse que pour une paroi lisse. En plus des interférences linéaires, certains chocs diffractés peuvent interagir parfois de manière non linéaire selon l'angle entre les fronts d'onde et l'amplitude des chocs.

## 4 Conclusion

La réflexion d'ondes en  $N$  a été étudiée expérimentalement et numériquement pour des angles rasants et des surfaces rigides. La comparaison des résultats de mesures de la distribution de pression acoustique et de simulations numériques montrent un bon accord dans le cas de la

réflexion d'une onde de choc acoustique sphérique sur une paroi rigide et lisse. Plusieurs régimes de réflexion ont été observés en fonction du paramètre critique  $a$  conformément aux résultats obtenus par Baskar *et al.* dans le cas d'une onde plane. Il a été observé que lorsque le régime de réflexion est irrégulier, la hauteur du pied de Mach évolue linéairement avec la distance de propagation, et cette hauteur est fonction du paramètre critique  $a$ . Dans le cas d'une surface rugueuse, la formation du pied de Mach est retardée, et la hauteur diminuée. Des interactions linéaires et non linéaires entre les contributions diffractées sont observées.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale pour la Recherche pour le support qu'elle a accordée à ce projet (ANR-12-ASTR-0038 : projet LORETA). Ce travail a été réalisé au sein du Labex CeLyA de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060 ANR-11-IDEX-0007).

## Références

- [1] E. Mach, "Über den Verlauf von Funkenwellen in der Ebene und im Raume", *Sitzungsbr. Akad. Wiss. Wien*, **78**, 819–838, 1878.
- [2] J. von Neumann, "Oblique reflection of shock", In *John von Neumann Collected Work, vol. 6* (ed. A. H. Taub), 238–299, 1963.
- [3] G. Ben-Dor, "Shock Wave Reflection Phenomena", Springer, 1992.
- [4] S. Baskar, F. Coulouvrat, R. Marchiano, "Nonlinear reflection of grazing acoustic shock waves : unsteady transition from von Neumann to Mach to Snell-Descartes reflections", *J. Fluid. Mech.*, **575**, 27–55, 2007.
- [5] E. A. Zabolotskaya, V. R. Khokhlova, "Quasi-plane waves in the nonlinear acoustics of confined beams", *Sov. Phys. Acoust.*, **15**, 35–40, 1969.
- [6] M. Brio and J. K. Hunter "Mach reflection for the two-dimensional Burgers equation", *Physica D*, **60**, 194–207, 1992.
- [7] R. Marchiano, F. Coulouvrat, S. Baskar, J. L. Thomas, "Experimental evidence of deviation from mirror reflection for acoustical shock waves", *Phys. Rev. E*, **76**, 056602, 2007.
- [8] G. Smeets, "Laser interference microphone for ultrasonics and nonlinear acoustics", *J. Acoust. Soc. Am.* **61**, 872–875, 1977.
- [9] P.V. Yuldashev, M.M. Karzova, S. Ollivier, V. Khokhlova, Ph. Blanc-Benon, "Mach-Zehnder interferometry method for acoustic shock wave measurements in air and broadband calibration of microphones", *J. Acoust. Soc. Am.*, **137**(6), 2015.
- [10] B. André, T. Castelain, C. Bailly, "Shock-tracking procedure for studying screech-induced oscillations", *AIAA J.*, **49** (7), 2011.
- [11] M.M. Karzova, P.V. Yuldashev, V.A. Khokhlova, S. Ollivier, E. Salze, Ph. Blanc-Benon, "Characterization of spark-generated N-waves in air using an optical Schlieren method", *J. Acoust. Soc. Am.*, **137**(6), 2015.
- [12] M.M. Karzova, P.V. Yuldashev, P.V., V.A. Khokhlova, S. Ollivier, Ph. Blanc-Benon, "Application of a Mach-Zehnder interferometer to the observation of Mach stem formation when a shock wave is reflected from a rigid surface", *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*, **79**(10), 2015.
- [13] G. S. Settles, "Schlieren and shadowgraph techniques", *Springer*, (2001.)
- [14] O. Marsden, C. Bogey, and C. Bailly, "A study of infrasound propagation based on high-order finite difference solutions of the Navier-Stokes equations", *J. Acoust. Soc. Am.*, **135** (3), 1083–1095, 2014.
- [15] C. Desjoux, S. Ollivier, O. Marsden, M.M. Karzova, Ph. Blanc-Benon, "Irregular reflection of weak acoustic shock pulses on rigid boundaries : Schlieren experiments and direct numerical simulation based on a Navier Stokes solver", *Physics of Fluids*, **28**, 027102, 1–14, 2016.
- [16] D. Dragna, Ph. Blanc-Benon, F. Poisson, "Time-domain solver in curvilinear coordinates for outdoor sound propagation over complex terrain", *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**(6), 3751–3763, 2013.