

Etude expérimentale de la réflexion de Mach

Y. MAILLOT^{A,B}, I. SOCHET^B, J.Y. VINÇONT^A, Y. GRILLON^A

^ACommissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives – CEA, DAM, DIF F-91297 Bruyères-le-Châtel, France. jean-yves.vincont@cea.fr ; yves.grillon@cea.fr

^BInstitut National des Sciences Appliquées Centre Val de Loire, Université d'Orléans, PRISME EA 4229, Bourges, France. yohann.maillot@insa-cvl.fr ; isabelle.sochet@insa-cvl.fr

Résumé :

L'objet de cette étude est de caractériser expérimentalement la réflexion non régulière en régime de Mach d'une onde de choc sur une surface plane indéformable et parfaitement réfléchissante. Pour cela, deux configurations d'essais ont été investiguées et confrontées. Les ondes de choc résultent de la détonation de charges gazeuses sphériques ou hémisphériques. La première configuration consiste à faire détoner une charge sphérique au-dessus d'un sol plan, mécaniquement indéformable, et la seconde considère une charge hémisphérique près d'un plan-mur, qui, par une rotation de 90°, est équivalente à la première configuration. Dans la première configuration, le mélange gazeux est contenu dans un ballon de baudruche et est initié en son centre à une hauteur d'explosion choisie (HOB : Height Of Burst). Pour la seconde configuration, le mélange est contenu dans une bulle de savon hémisphérique et initié au centre du disque qui constitue la base de l'hémisphère. La distance entre le centre de l'explosion et le mur, HOB, est celle choisie pour la première configuration. Dans les deux cas, l'onde de souffle générée se réfléchit sur le plan où se développe une réflexion de Mach. Un pied de Mach se propage donc le long de la paroi. Afin de confronter les approches géométriques, des mesures à l'aide de capteurs de pression au niveau des parois ainsi que des visualisations de l'écoulement et de suivi de l'onde de choc à l'aide d'une caméra rapide ont été réalisées. Les capteurs de pression ont permis d'acquérir notamment des mesures de surpression et de temps d'arrivée. Les hauteurs de pied de Mach et des temps d'arrivée ont été mesurés à partir des images issues des différentes visualisations. Les résultats ont montré que nos expériences permettaient de retrouver la loi de similitude de Hopkinson. Ils ont également montré globalement une assez bonne concordance entre les deux configurations, sphérique et hémisphérique, sur les temps d'arrivée (vidéos et capteurs), l'évolution du pied de Mach et sur l'évolution de la surpression en fonction de la distance.

Mots clés : Onde de choc, Réflexion de Mach, Pied de Mach

Experimental study of Mach reflection

Abstract :

The aim of this experimental study is to characterize the non-regular Mach reflection of a shock wave on a plane surface, which is supposed non-deformable and perfectly reflective. Therefore, two configurations have been investigated and confronted. The shock waves result from the detonation of spherical or hemispherical gaseous charges. The first configuration consists in detonating a spherical charge above a near-surface mechanically non-deformable and the second one considers a hemispherical charge close to a wall, representing a 90° rotation of the first scenario. With the first configuration, the gaseous mixture is contained in a balloon and is initiated at its center at a chosen Height of Burst (HOB). For the second one, the mixture is contained in a hemispherical soap bubble and is also initiated at its center, the distance between the center of the explosion and the wall is identical to the HOB chosen during the first configuration. In both cases, the blast wave is reflected on the plane where a Mach stem develops, which spreads along the surface. In order to compare the two configurations, measurements were carried out with pressure sensors as well as optical monitoring method using a high-speed camera. The pressure sensors acquired overpressure and the arrival time. The Mach stem heights and arrival times were measured from the pictures produced during the various visualization tests. The results show a good agreement with de Hopkinson scaling law as expected. They revealed so a relative good agreement between the two configurations, spherical and hemispherical, on the arrival times (videos and sensors), the evolution of the Mach stem on the planes and on the behavior of the overpressure as a function of the distance.

Key words : Shock wave, Mach reflection, Mach stem

1. Introduction

L'objet de cette étude est la caractérisation expérimentale de l'évolution des ondes de choc consécutives à la détonation d'une charge de gaz située près d'un plan, supposé mécaniquement parfaitement indéformable. La détonation engendre une onde de souffle, sphérique divergente, élevant la pression et la température. Lorsque l'onde de choc impacte une surface, mécaniquement indéformable, il en résulte une onde de choc réfléchie se propageant dans les gaz déjà choqués par la première onde incidente. Les réflexions se catégorisent en deux ensembles, les réflexions régulières et irrégulières [1]. Parmi les réflexions irrégulières, l'étude présente porte sur des cas d'évolution d'un pied de Mach. L'onde de choc réfléchie rattrape l'onde de choc incidente pour fusionner et former un nouveau front appelé onde de Mach. L'intersection des trois fronts forme le point triple, et la trajectoire de celui-ci est appelée ligne de glissement. La hauteur du pied de Mach augmente lorsque le point triple s'éloigne de la surface de réflexion.

Plusieurs expériences ont été effectuées afin de caractériser la formation et l'évolution du point triple en fonction de l'angle du choc et du nombre de Mach amont [2,3]. Dans la littérature ces études portent généralement sur des charges chimiques condensées telles que le TNT. Une caractéristique originale de cette étude est que l'explosif est gazeux. Il est constitué d'un mélange propane-oxygène en proportion stœchiométrique.

De plus les expériences sont réalisées dans un environnement clos et bien maîtrisé, au sein d'un laboratoire de recherche. Les expériences ont ainsi été réalisées à échelle d'un laboratoire, avec un banc d'expérimentation de l'ordre du mètre. Les ondes de choc sont étudiées à l'aide de mesures de surpression et de visualisations. Ces dernières permettent le suivi de l'évolution de la hauteur du point triple. Une technique optique d'ombroscopie a alors été utilisée [4,5] afin de visualiser et de mesurer le parcours de l'onde sur le plan de réflexion et suivre ainsi quantitativement l'évolution du pied de Mach

Les montages expérimentaux et la métrologie utilisée seront donc tout d'abord présentés, puis deux configurations expérimentales qui ont été mises en œuvre. La première configuration met en jeu une charge explosive de forme sphérique qui est placée au-dessus d'un plan réflecteur. Les conditions de charge et de distance au-dessus du plan réflecteur sont choisies de telle sorte qu'un pied de Mach se forme sur ce plan. L'étude a porté sur deux paramètres d'influence, le premier étant la hauteur de l'explosion, distance entre le centre de la charge et le plan réflecteur de l'onde, et le second la quantité de gaz de la charge lors de la détonation. Cette première approche géométrique du problème doit notamment permettre d'évaluer la qualité des expérimentations. En effet les couples charge et HOB ont été choisis tels que que les résultats des mesures doivent vérifier la loi de similitude énergétique de Hopkinson [2].

Une fois le pied de Mach caractérisé pour des charges sphériques gazeuses, une seconde configuration a été mise en œuvre. Cette configuration alternative a consisté en la détonation d'une charge cette fois de forme hémisphérique et posée sur un plan réflecteur. La charge est ensuite placée à la distance, HOB, d'un plan vertical lui-même réflecteur. Alors, pour une source donnée et constituée d'une valeur de charge et d'une distance au plan où doit se développer le pied de mach, en théorie, les deux configurations sont identiques. Elles doivent donc fournir les mêmes évolutions des indicateurs mécaniques : temps d'arrivée, surpression et hauteur du pied de Mach notamment. La comparaison des résultats de ces indicateurs entre les deux configurations doit donc permettre de montrer les effets de mise en œuvre technique par rapport à l'approche théorique.

2. Dispositif expérimental

2.1 Dispositions des charges et des capteurs de pression

Au cours de ces travaux, deux configurations géométriques théoriquement équivalentes ont été étudiées. Pour des charges sphérique et hémisphérique de mélange stœchiométrique propane-oxygène, les amorçages sont effectués en leurs centres à l'aide de la méthode du fil explosé.

La première configuration propose la détonation d'une charge sphérique au-dessus d'un plan, supposé mécaniquement parfaitement indéformable. Le gaz est contenu dans un ballon de baudruche sphérique maintenu à l'aide d'un portique à hauteur variable.

Cette dernière se situe au-dessus d'un plan (figure 1), où se réfléchit l'onde générée après détonation de la charge gazeuse. C'est le long de ce plan que sont étudiés les surpressions générées et l'évolution du pied de Mach par le suivi de la hauteur du point triple.

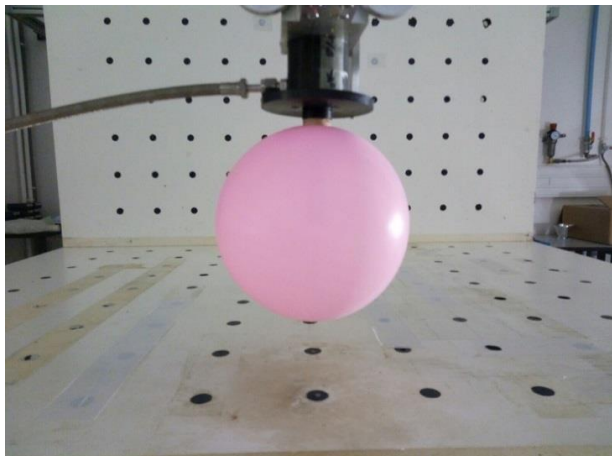


Figure 1 Charge explosive sphérique avec capteurs au sol (pastilles noires)

La seconde configuration est l'étude d'une charge hémisphérique positionnée sur la table d'essais, près d'un plan-mur installé perpendiculairement à la table. C'est donc sur ce plan-mur que sont étudiés les surpressions générées et l'évolution du pied de Mach par le suivi de la hauteur du point triple. Le gaz est contenu dans une bulle de savon et l'amorçage évidemment effectué au centre du disque formant la base de l'hémisphère. La seconde configuration est donc équivalente à la première selon une symétrie et une rotation de 90° (figure 2).



Figure 2 Charge explosive hémisphérique et capteurs de pression sur le plan-mur (pastilles noires)

Afin de caractériser l'onde de choc, des essais ont été effectués à des hauteurs d'explosions dites HOB (Height Of Burst) et rayons de charge R_0 différents. La HOB est la distance entre le centre de la charge et le plan de réflexion sur lequel se développera un pied de Mach, horizontal ou vertical selon la configuration. Différentes campagnes ont été réalisées afin d'étudier d'une part l'influence de la hauteur de la charge explosive et d'autre part le volume (i.e R_0) de cette dernière. L'énergie mise en jeu au moment de la détonation est fonction du volume de la charge et s'exprime par :

$$E_{\text{gaz}} = \frac{4}{3} * \pi * R_0^3 * E_v \quad (\text{MJ})$$

Avec E_v l'énergie volumique de réaction. Dans le cas d'une détonation d'une charge gazeuse stœchiométrique propane-oxygène, cette énergie volumique est telle que $E_v = 15,14 \text{ m.MJ}^{-1/3}$. Pour mieux analyser certains des résultats, les distances et les temps sont réduits à la racine cubique de l'énergie. Cette réduction permet d'exprimer l'ensemble des campagnes uniquement en fonction de la HOB réduite (HOB^*) ($\text{m.MJ}^{-1/3}$). L'énergie libérée par la charge de gaz de rayon R_0 est définie par E_{gaz} , avec une énergie volumique constante E_v .

$$\text{HOB}^* = \frac{\text{HOB}}{E_{\text{gaz}}^{1/3}} \quad (\text{m.MJ}^{-1/3})$$

Le tableau 1 rassemble toutes les campagnes réalisées en fonction de la HOB et du rayon de la charge explosive.

HOB* ($\text{m.MJ}^{-1/3}$)	HOB = 0,10 m	HOB = 0,15 m	HOB = 0,20 m
$R_0 = 0,04 \text{ m}$	0,627 (s)		
$R_0 = 0,05 \text{ m}$	0,502 (s)		1,003 (s)
$R_0 = 0,06 \text{ m}$	0,418 (s ; h)	0,627 (s)	0,836 (s ; h)
$R_0 = 0,08 \text{ m}$			0,627 (s)

Tableau 1 Configurations étudiées pour l'analyse des réflexions avec une charge sphérique (s) et hémisphérique (h) par HOB réduite à l'énergie

Parmi les campagnes d'essais avec les HOB de 0,10 m et 0,20 m, a été expérimenté une charge commune correspondant à un rayon de 0,06 m entre les configurations en sphérique et en hémisphérique. Les résultats attendus en surpression et en hauteur de point triple devraient en théorie être absolument égaux. Des mesures de surpressions sont donc réalisées le long des parois, pour chaque configuration, au sol pour les essais avec la charge sphérique et sur le mur pour les essais avec la charge hémisphérique. Des capteurs de pression de type piézoélectrique sont à cet effet disposés affleurant la surface de réflexion.

De plus, le tableau 1 permet d'identifier les paramètres pris en compte. L'influence de la hauteur d'explosion à volume constant est étudiée : HOB = 0,10 m ; 0,15 m ; 0,20 m pour un rayon de charge de 0,06 m. L'influence du volume de la charge (i.e R_0) à une hauteur

d'explosion constante est analysée, à une HOB = 0,10 m pour des rayons de charges $R_0 = 0,04$ m ; 0,05 m ; 0,06 m et à une HOB = 0,20 m pour des rayons de charges $R_0 = 0,05$ m ; 0,06 m ; 0,08 m. L'intégralité de ces sept campagnes avec une charge sphérique a permis de connaître l'influence des deux paramètres cités ci-dessus. Deux campagnes avec une charge hémisphérique ont été réalisées afin de comparer les deux configurations.

2.2 Montage optique

La technique de visualisation utilisée a été proposée par Hargather et Seetles [4] et a été reproduite au laboratoire. Cette dernière est une variante de celle d'Edgerton (1958) [5] permettant également l'observation en champ large de l'ombre du phénomène par l'utilisation d'un fond rétro-réfléchissant. Il s'agit d'une méthode d'ombroscopie directe qui peut être utilisée à des fins quantitatives, dans l'étude de propagation d'onde [6], [7] mais dont nous n'avons pas besoin ici puisque ne cherchant qu'à mesurer les positions des fronts d'onde et de leur intersection au niveau du point triple. Le champ qui a pu être visualisé couvre une longueur de propagation de 0,50 m et une hauteur de 0,20 m.

Cette méthode permet un parfait alignement entre l'axe optique et l'axe lumineux afin d'obtenir un montage ombroscopique plus précis pour suivre l'évolution des ondes de choc. Il permet en effet de ne pas avoir à la fois l'objet et son ombre sur le même écran. La coïncidence des champs de visualisation et lumineux donne alors une information sur la localisation, la forme et la vitesse de l'onde. Cet aspect est important afin de pouvoir mesurer la hauteur du pied de Mach en fonction de son emplacement sur la paroi.

Lors des expériences, la caméra utilisée est une Phantom V7.3 avec une résolution spatiale de 512 x 256 pixels et un échantillonnage d'une fréquence d'une image toutes les 46 μ s, pour un temps d'exposition de 1 μ s. L'objectif utilisé est de 50 mm de focale. La source lumineuse a un flux lumineux de 10 000 lumens, la lumière est focalisée sur le miroir, à l'aide d'une lentille plano convergente.

La calibration des images a été effectuée à partir d'images tests et de repères géométriques. Elle conduit à une résolution de 1,023 mm.pix⁻¹ pour la charge explosive sphérique et de 0,78 mm.pix⁻¹ pour celle hémisphérique. Pour toutes les mesures de transition de réflexion, de hauteur et de pied de Mach, le nombre de pixels est lu directement sur l'image. Une erreur de deux pixels a été retenue dans les mesures de distances au sol, soit 1,5 à 2 mm selon la configuration. Cette erreur vient de la position imprécise de l'onde de choc légèrement floue lors de l'enregistrement.

3. Résultats

3.1 Visualisations expérimentales

La mise en œuvre de ces essais a permis l'étude du développement d'une réflexion irrégulière particulière, la réflexion de Mach, comme il est montré schématiquement sur la figure 3. Une fois que l'onde réfléchie (ODC ref) rattrape l'onde incidente (ODC inc), le point de formation du pied de Mach se fait à la distance au sol notée d_0 , la mesure de la hauteur du point triple (H_M) se fait à la distance au sol R_{sol} . Pour cela, des tests ont été réalisés afin de caractériser ce phénomène, en faisant varier deux paramètres ; la hauteur d'explosion (HOB), et le volume de la charge donc le rayon R_0 . Pour certaines analyses, les mesures et les distances sont rapportées à la racine cubique de l'énergie. Plusieurs cas d'étude ont été réalisés pour un seul rayon ($R_0 = 0,06m$) de charge avec trois HOB différentes, puis pour deux HOB (0,10 m et 0,20 m) mais avec trois rayons de charges différents (tableau 1).

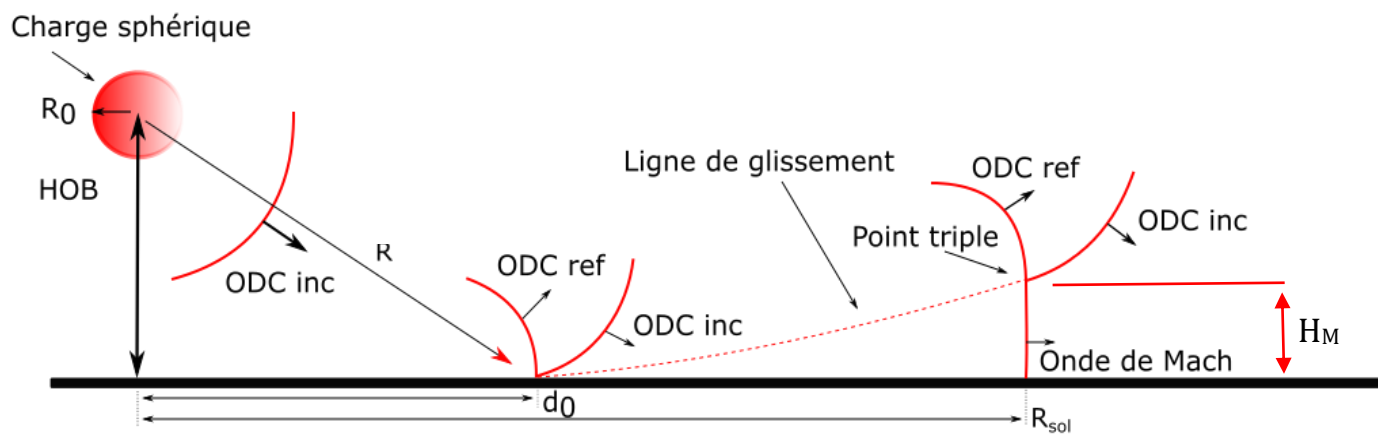


Figure 3 Evolution du pied de Mach

A l'aide de la visualisation, les essais ont permis de connaître l'influence des deux paramètres lors des mesures des hauteurs de pied de Mach. Des exemples d'images issues des visualisations réalisées lors des différents essais, avec une charge sphérique, sont reportées figures 4 et 5.

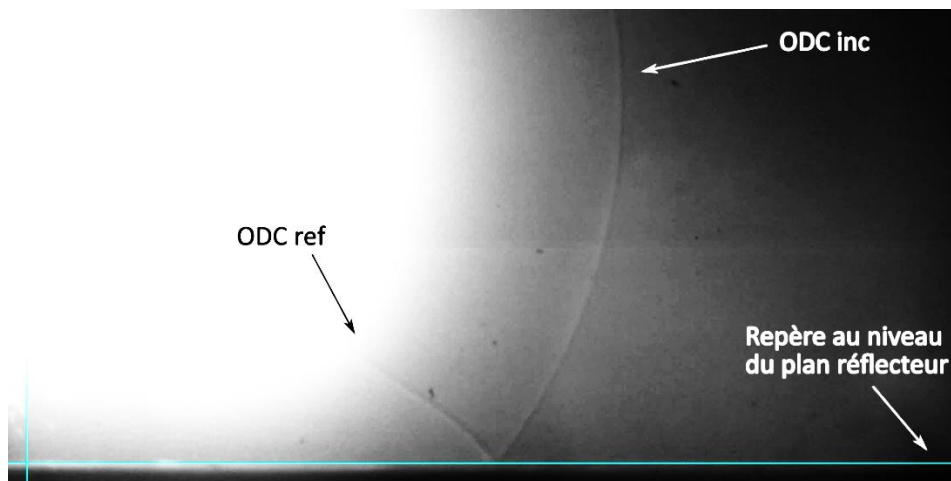


Figure 4 Naissance du pied de Mach à $d_0 = 0,257$ m et $t_a = 0,413$ ms. HOB = 0,20 m et $R_0 = 0,08$ m

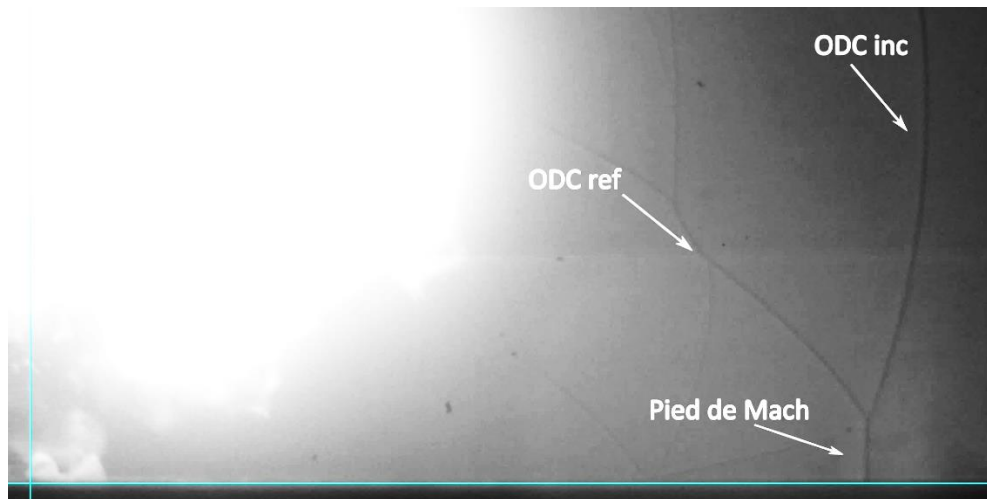


Figure 5 Pied de Mach à $R_{sol} = 0,417$ m, $t_a = 0,686$ ms, $H_M = 24,25$ mm. $HOB = 0,20$ m et $R_0 = 0,08$ m

Des essais avec une charge hémisphérique ont donc été effectués. Comme pour la charge sphérique, la hauteur du pied de Mach est mesurée sur l'image. Un exemple d'images, résultant d'une visualisation avec la seconde configuration, est représenté figure 6. Avec ce type de visualisations, la hauteur du pied de Mach a pu être mesurée dans les deux configurations.

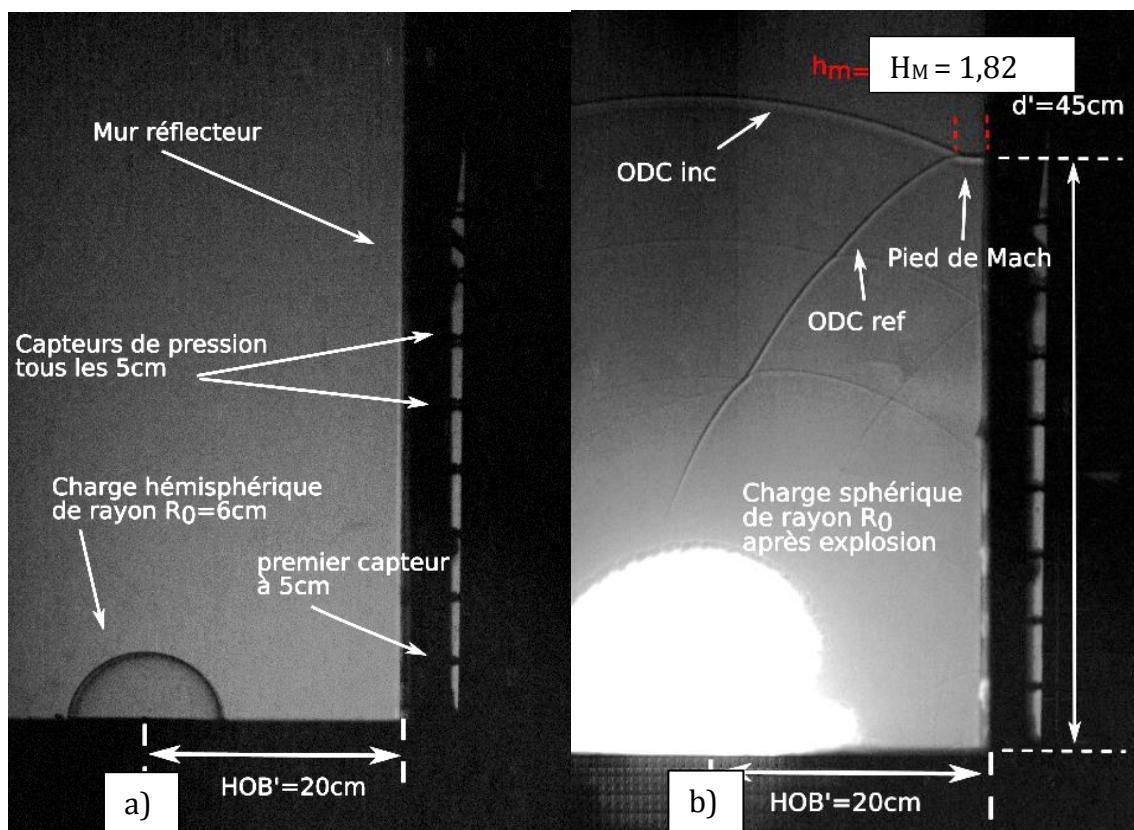


Figure 6 Charge hémisphérique à $HOB' = 0,20$ m de rayon $0,06$ m : a) avant explosion, b) $749,91$ μ s après explosion

Afin de valider les données issues des visualisations, le temps d'arrivée (T_a) de l'onde à l'aide des images enregistrées a été comparé aux temps d'arrivée enregistrés à partir des capteurs de pression en fonction de la distance par rapport au centre de la charge (R).

Les distances ainsi que les temps d'arrivée sont réduits à la racine cubique de l'énergie. Cette réduction facilite la représentation de toutes les campagnes sur le même graphique.

$$\text{Distance réduite : } \lambda = \frac{R}{E_{\text{gaz}}^{1/3}} \quad (\text{m. MJ}^{-1/3})$$

$$\text{Temps d'arrivée réduit : } T_a^* = \frac{T_a}{E_{\text{gaz}}^{1/3}} \quad (\text{ms. MJ}^{-1/3})$$

Ces temps d'arrivée sont représentés sur la figure 7 en fonction de la distance réduite λ . Ces mesures proviennent des signaux de surpressions et des visualisations et ont été comparées entre elles. Pour une source donnée constituée du couple (HOB ; R₀), les temps d'arrivée obtenus par les mesures de pression se superposent avec les temps d'arrivée issus de la visualisation. Cette étape permet de valider l'étalonnage chronométrique entre les deux dispositifs de mesure : surpression et enregistrement vidéo. Les temps d'arrivée issus de la visualisation ont été mesurés à l'aide de la calibration des images précisée précédemment et de la position de l'onde sur le plan réflecteur, ce qui permet de valider l'étalonnage spatial. Pour les mesures de temps d'arrivée issus, à la fois de la visualisation et des capteurs de pression, la valeur moyenne des écarts types a été calculée et ainsi le pourcentage d'erreur est inférieur à 3%.

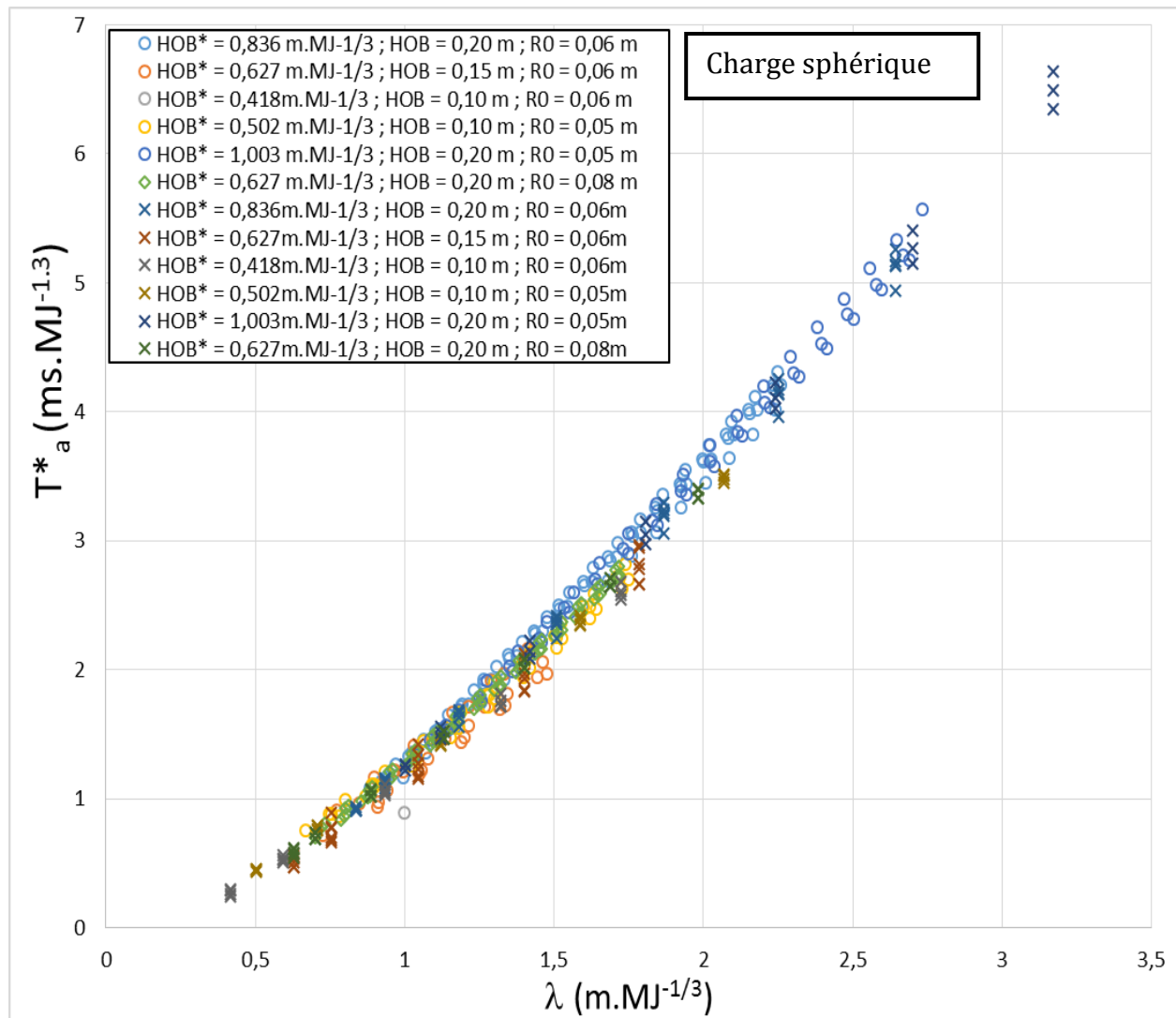


Figure 7 Comparaison des temps d'arrivée réduits en fonction de la distance réduite issus de la visualisation (o) et par les mesures obtenues avec les capteurs de pression (x)

3.2 Analyse des résultats avec une charge sphérique

Sur la figure 8, est représentée l'évolution de la hauteur du pied de Mach H_M en fonction de la distance au sol. La distance au sol R_{sol} est définie comme la distance de mesure à l'hypocentre.

Ces évolutions sont représentées pour les différentes altitudes HOB de charges explosives expérimentées. La figure 8 donne l'évolution de la hauteur du pied de Mach H_M en fonction de la distance au sol R_{sol} par hauteur d'explosion HOB et rayon de charge R_0 . Cette figure permet de mettre en avant les effets de plusieurs paramètres. Le premier paramètre est l'influence de la hauteur d'explosif à rayon de charge constante, trois campagnes à rayon de charge $R_0 = 0,06$ m aux altitudes de 0,10 m ; 0,15 m et 0,20 m sont représentées. Le second paramètre est l'influence du rayon de charge à une altitude constante. Ces dernières sont représentées par des carrés pour une hauteur d'explosion de 0,10 m puis par des triangles pour une hauteur de 0,20 m.

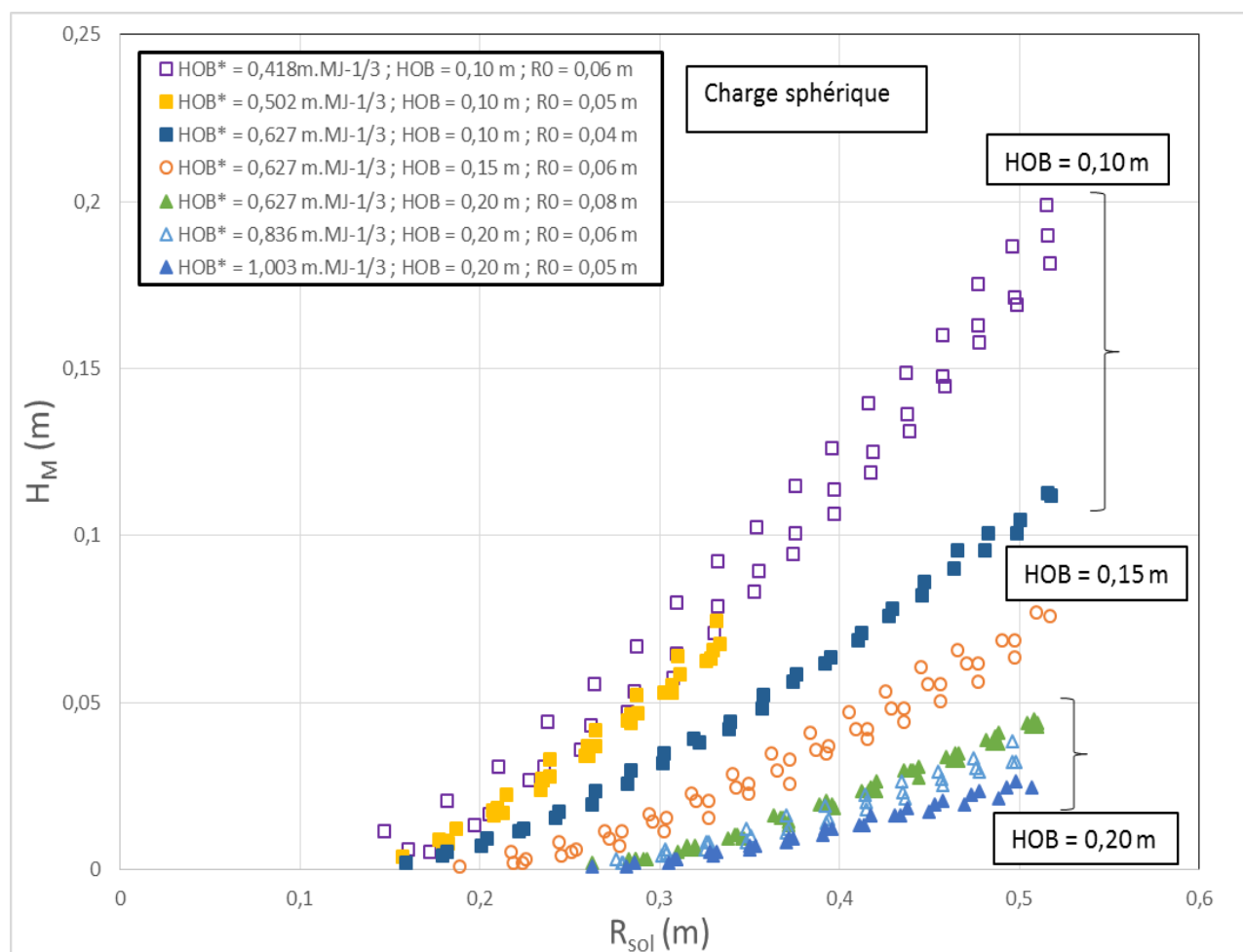


Figure 8 Evolution de la hauteur du point triple en fonction de la distance sol par HOB dans le cas des charges explosives sphériques

La figure 8 montre qu'à rayon de charge constant, plus la hauteur d'explosion est faible, plus le pied de Mach tant à se former rapidement. Il est bien souligné qu'à une distance au sol R_{sol} fixée, la taille du pied de Mach est plus élevée lorsque la charge explosive est plus proche du sol.

De plus à une HOB fixe, plus le rayon de la charge R_0 est grand plus la hauteur H_M du pied de Mach augmente à une distance au sol fixée. Le pied de Mach tend à apparaître au même endroit sur la surface quel que soit le rayon de la charge utilisée.

La même analyse de résultats a déjà été produite pour des charges allant de un à plusieurs kilogrammes de TNT, sur un champ de mesures allant de un jusqu'à des centaines de mètres [2,3]. L'approche et les résultats proposés sont très encourageants pour l'étude des ondes de choc en laboratoire. Les charges gazeuses mises en jeu lors des différents tests sont des sphères ne dépassant pas la dizaine de centimètres de rayon, pour une plage de mesures sur plusieurs dizaines de centimètres.

Pour chacune des campagnes de tirs effectuées, des mesures de surpression ΔP^+ ont été réalisées au niveau du sol. L'évolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol est représentée sur deux figures afin d'avoir une meilleure visibilité. La figure 9 représente l'évolution de la surpression réfléchie pour les trois hauteurs d'explosion pour un rayon $R_0 = 0,06$ m, tandis que la figure 10 met en évidence l'influence du rayon à une HOB constante, ici de 0,20 m.

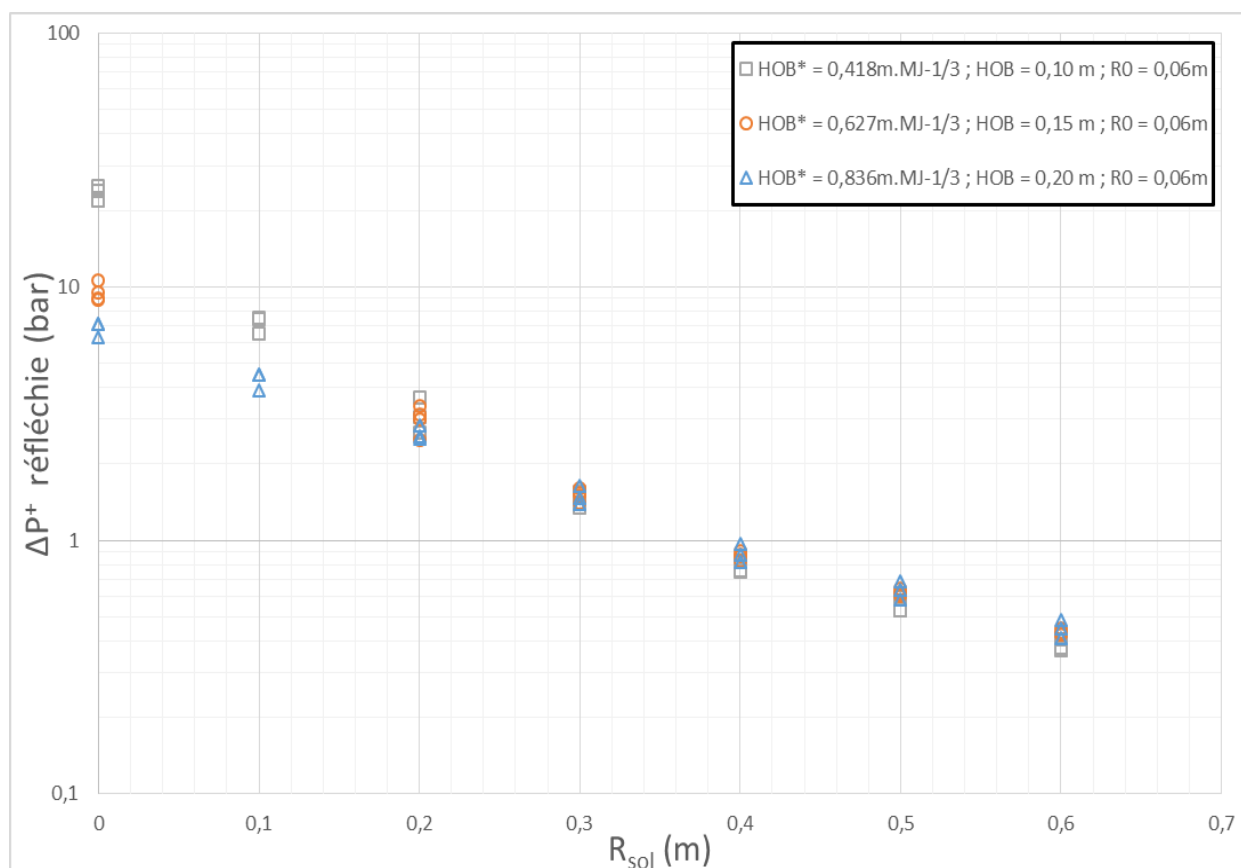


Figure 9 Evolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol par HOB dans le cas des charges explosives sphériques concernant $R_0 = 0,06$ m pour des HOB = 0,10m ; 0,15m ; 0,20m

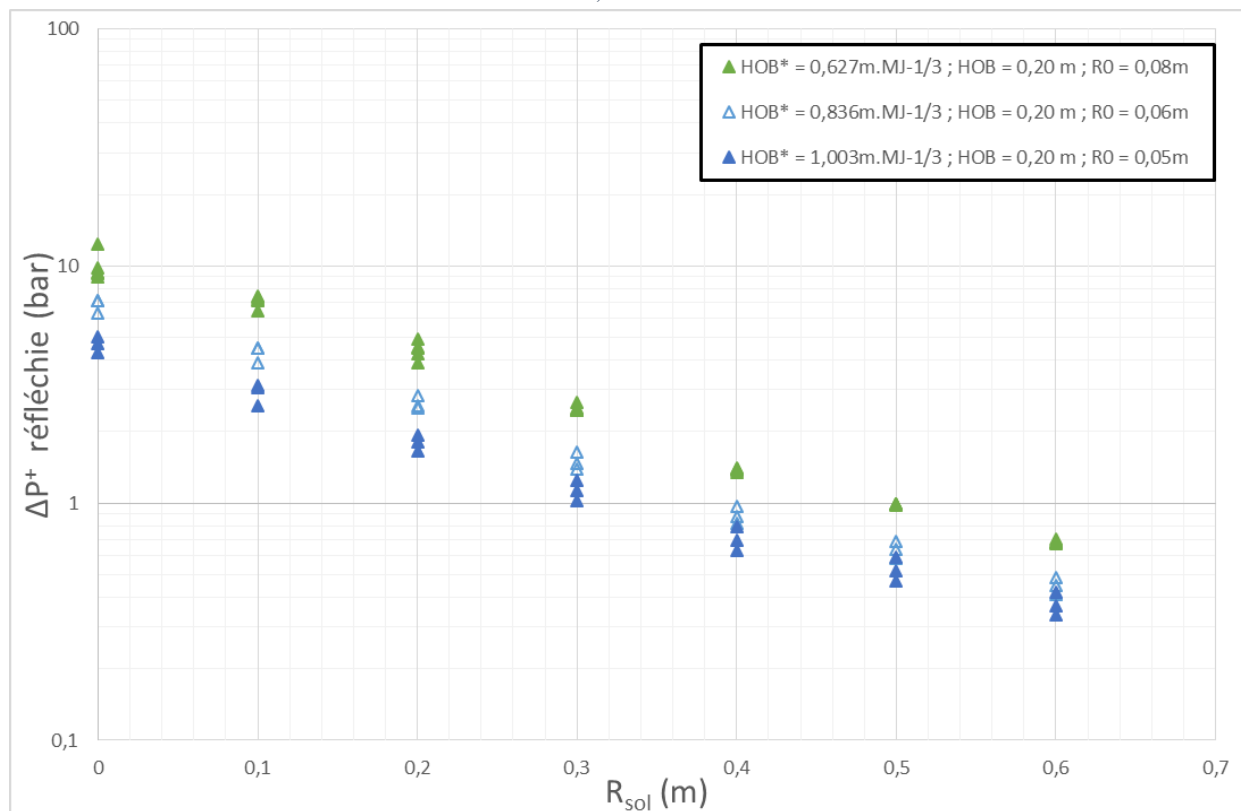


Figure 10 Evolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol dans le cas des charges explosives sphériques concernant une HOB = 0,20 m pour $R_0 = 0,08$ m ; 0,06 m ; 0,05 m

La figure 9 permet de connaître l'influence de la hauteur de l'explosion sur la surpression réfléchie. Il est observé qu'en deçà de la distance au sol de 0,30 m, plus la charge est proche du sol plus la surpression réfléchie est élevée. Au-delà de cette distance au sol, la surpression est plus élevée pour une hauteur d'explosion plus éloignée du sol. Cette distance correspond à la naissance d'une réflexion de Mach pour une HOB = 0,20 m et un $R_0 = 0,06$ m. La figure 10 donne l'évolution de la surpression réfléchie au sol à une altitude constante de 0,20 m avec un volume de charge variable. Plus le volume de la charge est grand (i.e R_0) plus la surpression réfléchie est élevée. Le pied de Mach apparaissant à la même distance au sol, aucun changement sur l'évolution de la surpression réfléchie n'est souligné entre les trois campagnes.

Les expériences réalisées pour les couples $\{(HOB=0,10m ; R_0=0,04m) ; (HOB=0,15m ; R_0=0,06m) ; (HOB=0,20m ; R_0=0,08m)\}$ respectent la loi de similitude de Hopkinson [2]. Ces trois expériences sont donc en théorie strictement équivalentes. En fonction de la distance au sol, les mesures d'évolution de la hauteur du pied de Mach en figure 11 et de la pression au sol en figure 12, permettent d'évaluer si la similitude est bien reproduite expérimentalement. La taille du pied de Mach et la distance au sol sont alors réduites en énergie selon la loi de Hopkinson.

$$\lambda_{sol} = \frac{R_{sol}}{E_{gaz}^{2/3}} \quad (m.MJ^{-1/3})$$

$$H_M^* = \frac{H_M}{E_{gaz}^{1/3}} \quad (m.MJ^{-1/3})$$

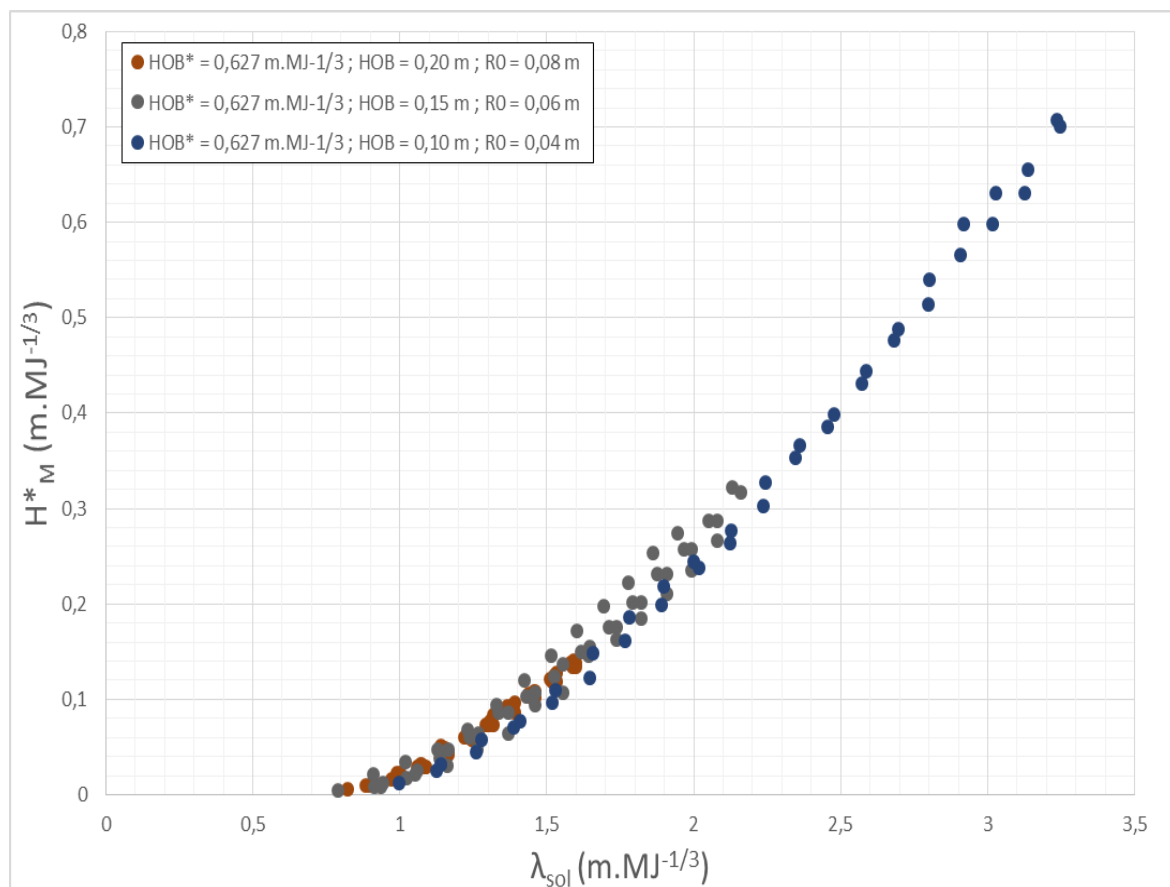


Figure 11 Evolution de la hauteur du pied de Mach pour une HOB réduite de $0,627 \text{ m.MJ}^{-1/3}$

La figure 11 montre que la loi de similitude est bien reproduite par les trois expériences puisqu'en échelle réduite les mêmes évolutions des hauteurs de pied de Mach sont observées. Les légères variations constatées sont à considérer comme une incertitude de mesure ou de réalisation et demeurent acceptables. On note également que pour une taille de banc expérimental donné, le fait de travailler avec une charge plus réduite permet évidemment d'explorer une zone d'effet et de développement du pied de Mach plus importante. Ces résultats montrent qu'il est possible de travailler avec des charges de petite énergie dont les effets sont représentatifs d'une charge de plus grande énergie. Il est donc possible de prédire l'évolution d'un pied de Mach avec une charge de volume quelconque, à partir d'expériences réalisées à échelle de laboratoire et de la loi de similitude de Hopkinson.

En toute rigueur pour les évolutions de ces deux indicateurs mécaniques, hauteur de pied de Mach et pression au sol, on devrait trouver respectivement figure 11 et 12, des résultats superposables.

Cependant pour les mesures d'évolution de la pression au sol de ces trois expériences en similitude énergétique, les conclusions sont plus contrastées que celles avec les hauteurs de pied de Mach. En effet la figure 12, en échelle logarithmique, montre que la charge de plus faible rayon présente un décrochement des valeurs de pression par rapport à celles des deux rayons supérieurs. Sur la pression la similitude théorique semble donc bien retrouvée expérimentalement entre les expériences ($HOB=0,15m$; $R_0=0,06m$) et ($HOB=0,20m$; $R_0=0,08m$) mais moins avec celle à ($HOB=0,10m$; $R_0=0,04m$). Vu la cohérence observée sur les évolutions de pied de Mach, cette différence peut être attribuée à des mesures de pression moins précises du cas avec le plus faible rayon de charge. Expérimentalement le meilleur compromis entre petitesse de la charge et vérification de la similitude est donc le couple ($HOB=0,15m$; $R_0=0,06m$).

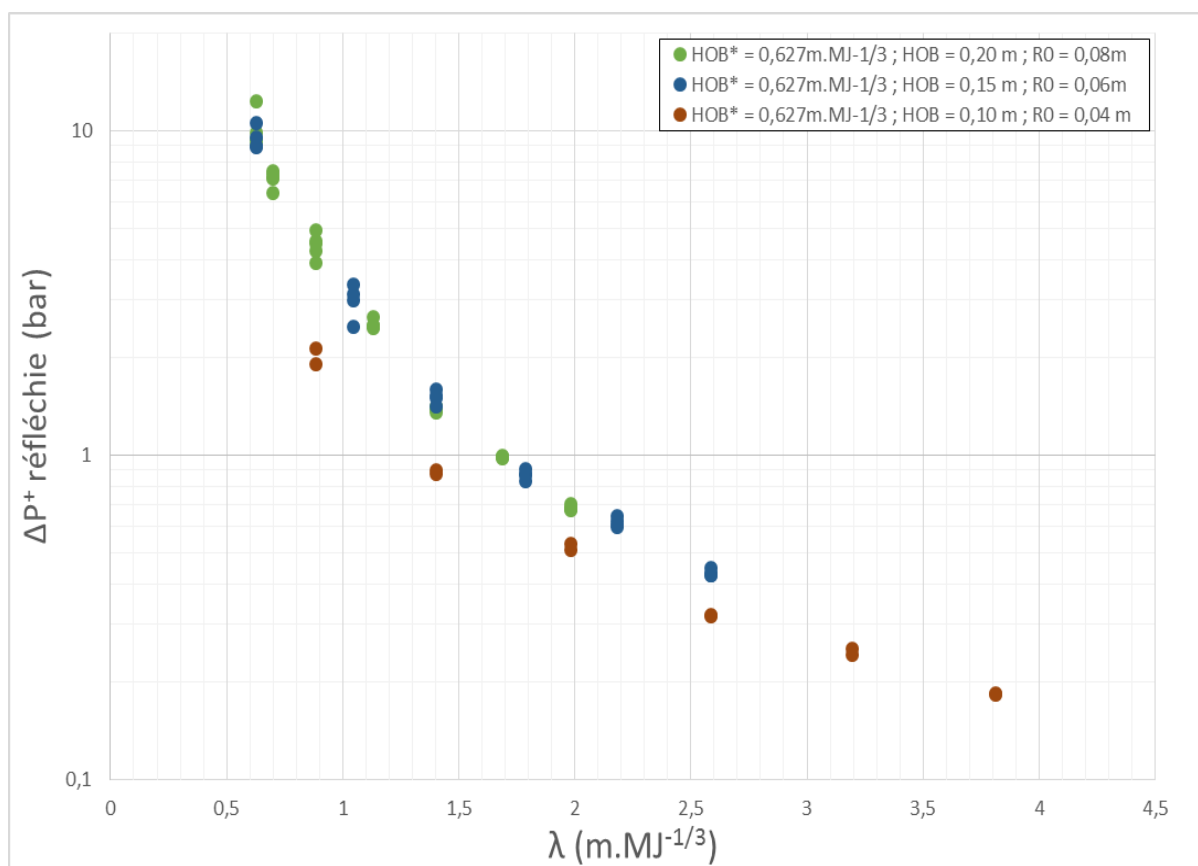


Figure 12 Evolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol pour une charge explosive sphérique à HOB^* constante

Ecart type (%)	HOB = 0,10 m		HOB = 0,15 m		HOB = 0,20 m	
	H_m	ΔP	H_m	ΔP	H_m	ΔP
$R_0 = 0,04$ m	6,0%	2.79%				
$R_0 = 0,05$ m	9.9%	8.59%			14.6%	10.05%
$R_0 = 0,06$ m	23,7%	7.98%	17.5%	5.80%	15,4%	6.81%
$R_0 = 0,08$ m					14.5%	4.95%

Tableau 2 Moyenne des écarts types sur le développement du pied de Mach et des surpressions réfléchies lors des essais avec des charges sphériques

Le tableau 2 présente le pourcentage d'erreur sur la mesure de pied de Mach issue des visualisations d'une part, et sur la surpression obtenue via les capteurs de pression d'autre part, pour chaque campagne de tirs. La moyenne des écarts types traduit à la fois l'erreur sur la mesure (de deux pixels comme précédemment définie), et la dispersion des résultats des hauteurs de pied de Mach.

3.3 Comparaison des deux configurations géométriques

Une fois la hauteur du point triple caractérisée pour une charge sphérique donnée, ces résultats ont été comparés à ceux issus de la seconde configuration. Celle-ci met en œuvre la détonation d'une charge cette fois hémisphérique et posée sur un plan supposé réflecteur. Elle génère une onde de choc à une distance réglable, HOB, d'un plan vertical (plan-mur).

Deux campagnes de tirs ont été réalisées et comparées entre elles, avec le même rayon de charge de $R_0 = 0,06$ m et deux HOB expérimentées à 0,10 m et 0,20 m soit un total de quatre expériences. A charge R_0 et HOB donnée, chaque configuration doit en théorie donner les mêmes surpressions et les mêmes évolutions de point triple.

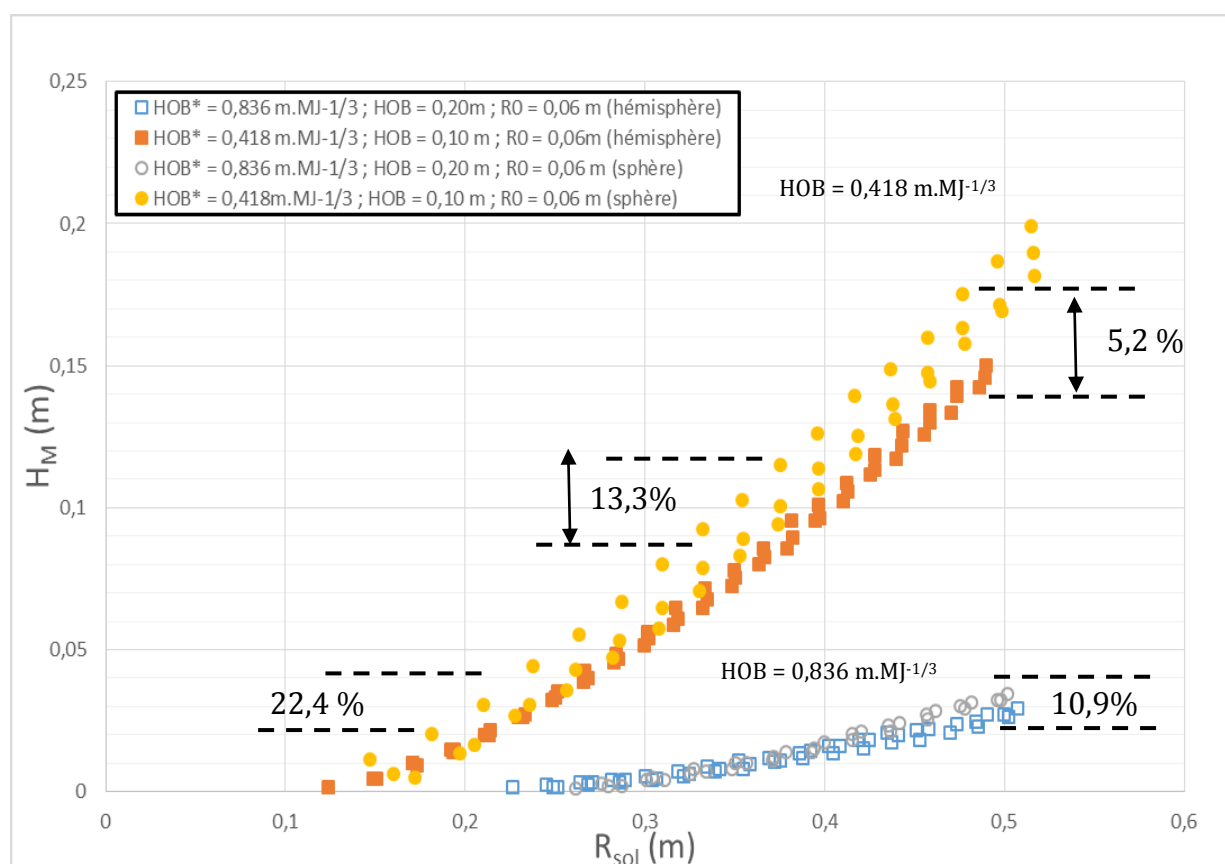


Figure 13 Comparaison de l'évolution de la hauteur du pied de Mach en fonction de la distance au sol entre une charge explosive sphérique et hémisphérique de rayon 0,06 m à une HOB de 0,2 m et 0,1 m

Pour les deux couples R_0 et HOB, la figure 13 montre une assez bonne concordance sur les évolutions de la hauteur du point triple entre les deux approches géométriques, celle sphérique et celle hémisphérique. Les faibles écarts observés sont probablement à attribuer au caractère non parfaitement réflecteur des surfaces, une partie de l'énergie de la charge serait ainsi absorbée. Cet effet est d'autant plus marqué que la pression exercée sur le plan est importante ce qui est le cas de la configuration hémisphérique puisqu'en contact direct avec celui-ci. Cette hypothèse est confortée avec les tendances observées précédemment puisque les hauteurs de pied de Mach des cas hémisphériques sont globalement en-dessous des cas sphériques.

Enfin dans le cas à $HOB = 0,20$ m, on note une plus grande dispersion des positions du point triple du cas sphérique par rapport au cas hémisphérique. Ceci n'est pas expliqué actuellement. Ce qui peut être considéré comme une incertitude de mesure demeure néanmoins acceptable.

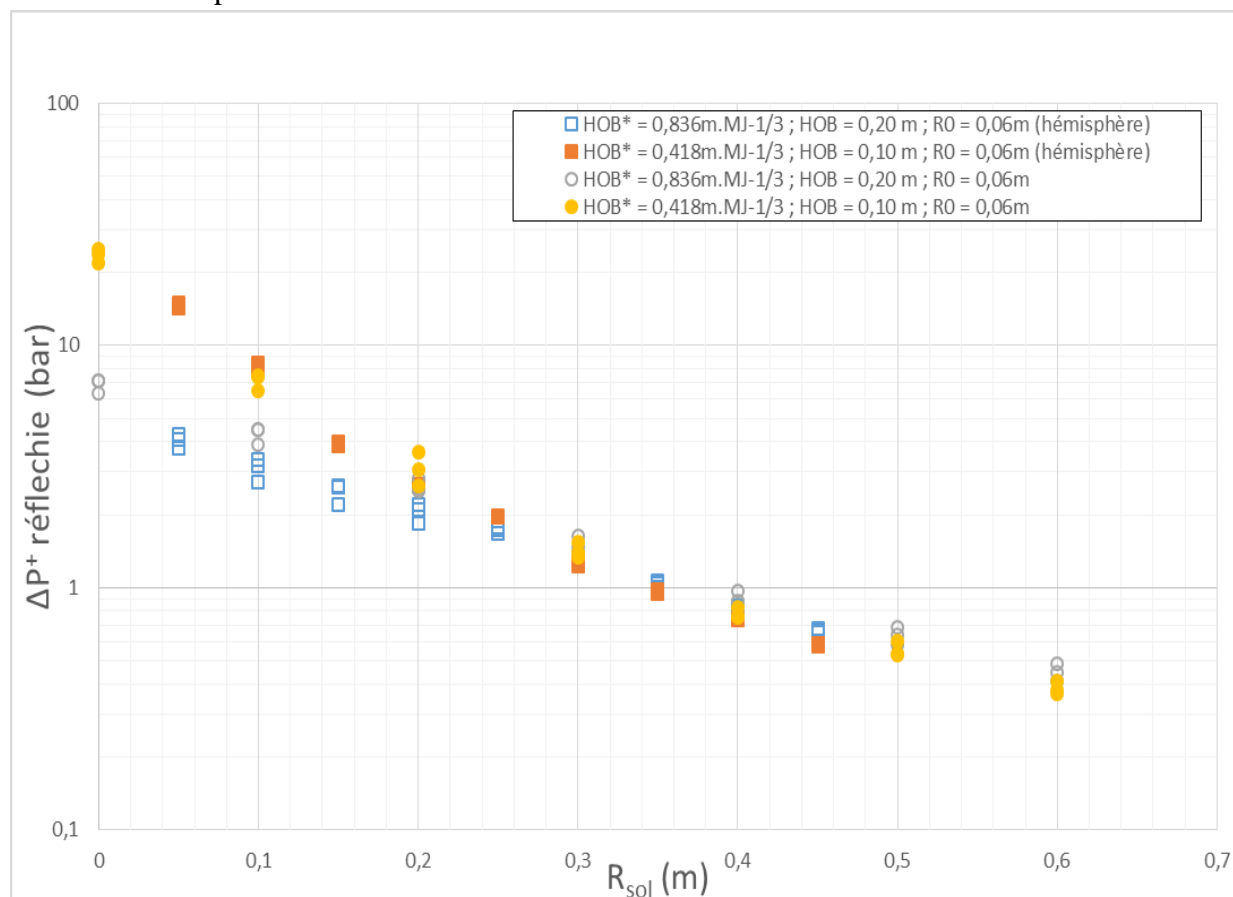


Figure 14 Comparaison de l'évolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol entre une charge explosive sphérique et hémisphérique de rayon 0,06 m à une HOB de 0,2 m et 0,1 m

Les mêmes comparaisons que pour l'évolution du pied de Mach sont effectuées sur l'évolution de la pression au sol.

La figure 14 présente l'évolution de la surpression réfléchie en fonction de la distance au sol pour les deux approches géométriques et toujours pour les deux mêmes couples ($HOB = 0,10$ m ; $R_0 = 0,06$ m) et ($HOB = 0,20$ m ; $R_0 = 0,06$ m). Pour la HOB la plus élevée on constate une correspondance très satisfaisante. Pour celle la plus faible en revanche on note que les pressions issues de la source hémisphériques sont un peu plus faibles que celles issues de la source sphérique.

La comparaison entre les deux configurations a montré que les hauteurs du point triple sont plus faibles pour une charge gazeuse explosive hémisphérique sur plan réflecteur, comparativement à une charge sphérique au-dessus d'un plan réflecteur. Pour la surpression cela est moins flagrant. Des résultats de la littérature [8], obtenus à partir de charges explosives beaucoup plus énergétiques que le mélange gazeux mis en œuvre ici, indiquent que les pressions au sol du cas hémisphérique devraient être inférieures. Sur la surpression cette tendance n'est que partiellement visible ici pour les deux couples (HOB , R_0) expérimentés. Elle est en effet observée pour la HOB la plus forte mais pas pour celle la plus faible.

Cette différence de comportement peut éventuellement s'expliquer par une précision des mesures de pression moindre que celle des hauteurs de point triple. L'absorption d'énergie par le plan supportant l'hémisphère est probablement faible et les différences en pression plus difficiles à saisir que sur l'évolution de la hauteur du pied de Mach.

4. Conclusion

L'étude a porté sur la caractérisation d'ondes de choc qui interagissent avec une paroi réfléchissante, dans des conditions qui conduisent à une réflexion de Mach. Une charge gazeuse, composée d'un mélange stœchiométrique de propane-oxygène, est détonée près d'un plan. Ce plan est supposé mécaniquement parfaitement indéformable. L'onde de choc générée se réfléchit ensuite sur ce plan situé à une distance notée HOB. Les conditions de charge et de HOB expérimentées sont choisies telles qu'une réflexion irrégulière dite onde de Mach apparaisse. Ces travaux ont eu pour but de déterminer l'évolution de la hauteur du pied de Mach sur le plan réflecteur et les pressions sur le sol (où se développe le pied de Mach) associées. Deux approches expérimentales géométriques différentes ont été mises en œuvre. Les services rendus par ces deux approches, en surpression et en évolution de la hauteur de pied de Mach, ont ainsi pu être comparés.

Dans la première configuration la charge explosive est contenue dans un ballon de baudruche sphérique disposé, à une distance HOB, au-dessus d'une paroi plane et réfléchissante sur laquelle se développe le pied de Mach. Dans la deuxième, la charge explosive est contenue dans une bulle de gaz hémisphérique posée sur un plan réflecteur et en présence d'une paroi verticale, supposée réfléchissante, située à la même distance HOB que pour la première configuration. Cette paroi est le lieu où se développe le pied de Mach.

Les moyens de mesures mis en œuvre permettent de caractériser l'évolution de l'onde de choc en surpression, de temps d'arrivée et de hauteur de pied de Mach en fonction de la distance. Afin de connaître l'évolution du point triple, une technique de visualisation et de mesure a été mise en place. Cette technique repose sur les principes de l'ombroscopie. Les mesures de surpression et de temps d'arrivée sont obtenues au sol ou, selon la configuration, sur la paroi verticale au moyen de capteurs de pression.

La première configuration a consisté en des essais pour une charge sphérique placée en hauteur, avec des HOB de 0,10 m; 0,15 m et 0,20 m, des rayons de 0,04m ; 0,05 m ; 0,06 m et 0,08 m. Les caractéristiques de l'onde de choc réfléchi sur le sol ont été comparées entre elles. En effet ces expériences ont été définies en respectant la loi de similitude énergétique de Hopkinson. On a donc cherché à évaluer la qualité de réalisation des expériences, mise en œuvre des explosions et des mesures associées, en regard de la similitude théorique attendue. Sur l'évolution des pieds de Mach une bonne concordance a été trouvée. Les résultats sont un peu moins satisfaisants sur l'évolution des pressions au sol pour le rayon de charge le plus faible. Ils sont bien meilleurs pour les deux autres rayons de charge plus élevés.

La deuxième configuration géométrique a fait intervenir une source explosive hémisphérique sur un plan réflecteur et en présence d'une paroi vertical (de distance réglable à la source, HOB) où se développe le pied de Mach. Elle a permis de contribuer à la validation de la méthode d'une source sphérique avec un ballon de baudruche contenant le mélange explosif. En effet les deux configurations sont géométriquement équivalentes, à une rotation de 90° près, et en supposant toutes les parois parfaitement mécaniquement réfléchissantes. Pour pouvoir comparer les résultats avec ces deux approches, les rayons de charges sont choisis identiques et le centre des charges est équidistant au plan réflecteur entre les deux configurations. Les essais ont ainsi été réalisés avec un rayon de charge de 0,06 m et une HOB = 0,10 m puis avec une HOB = 0,20 m afin de traiter deux HOB différentes.

Les hauteurs de pied de Mach mesurées ont montré des écarts relativement faibles entre une charge sphérique et une charge hémisphérique et une tendance qui montre que les hauteurs sont plus faibles dans le cas hémisphérique à charge et HOB donnée. Ceci peut s'expliquer par l'absorption d'une petite partie de l'énergie délivrée par la source hémisphérique au plan qui la supporte. Sur les niveaux de surpression les différences sont moins marquées alors qu'on pouvait s'attendre à des pressions plus faibles dans le cas hémisphérique pour les mêmes raisons. L'absence d'écarts significatifs peut être attribuée à une précision moindre des mesures de pressions par rapport à celles de hauteur de pied de Mach.

Références

- [1] Ben-Dor G. - Shock Wave Reflection Phenomena, Second Edition Springer, 2007
- [2] Kinney G.F., Graham K.L. - Explosive Shocks in Air. Second edition, Springer Verlag, Berlin, 1985
- [3] Kisters T., Kuder J. - Experimental Characterization of a Near-Field HOB-Detonation - Proceedings of the MABS Symposium, 2012
- [4] Hargather M.J., Settles G.S., Retroreflective shadowgraph technique for large-scale flow visualization, Applied optics, Vol. 48, No. 22, pp. 4449-4457, 2009
- [5] Edgerton H. E., Shockwave photography of large subjects in daylight, Rev. Sci. Instruments, vol. 29(2), pp. 171-172, 1958
- [6] Desjoux C., Ollivier S., Marsden O., Blanc-Benon P., Réflexion d'ondes de choc acoustiques faibles, 22^{ème} Congrès Français de Mécanique, 2015
- [7] Karzova M., Salze E., Ollivier S., Castelain T., André B., Yuldashev P.V., Khokhlova V., Sapozhnikov O., Blanc-Benon P., Interaction of weak shocks leading to Mach stem formation in focused beams and reflections from rigid surface: numerical modeling and experiment, Proceedings of the Acoustics, Nantes Conference, 2012
- [8] U.S. Army Corps of Engineers, Department of the Army, Unified Facilities Criteria (UFC), Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02, 5 December 2008