HAL
open science

Observation et étude des conditions de formation d'une onde de détonation de Mach

J.P. Argous, C. Peyre, J. Thouvenin

To cite this version:

J.P. Argous, C. Peyre, J. Thouvenin. Observation et étude des conditions de formation d'une onde de détonation de Mach. Journal de Physique, 1966, 27 (3-4), pp.190-195. 10.1051/jphys:01966002703-4019000 . jpa-00206386

HAL Id: jpa-00206386

https://hal.science/jpa-00206386

Submitted on 4 Feb 2008

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.

OBSERVATION ET ÉTUDE DES CONDITIONS DE FORMATION D'UNE ONDE DE DÉTONATION DE MACH

Par J. P. ARGOUS, C. PEYRE et J. THOUVENIN,
Commissariat à l'Énergie Atomique, Paris, France.

Resumé. — On observe et on étudie la formation d'une onde de détonation de Mach dans un explosif donné. Des vitesses de détonation de 10 à 14 mm/μs ont été mesurées. L'action de cette onde sur un métal comme le cuivre se traduit par des pressions de choc deux à trois fois supérieures.

L'évolution de cette onde à partir de sa formation est analysée. On montre qu'un état stationnaire peut être atteint si les conditions d'incidence sont elles-mêmes stationnaires.

Abstract — The formation of a Mach detonation wave in a given explosive is observed and studied. Detonation velocities as high as 10 to 14 mm/μs are measured. Two or three times higher shock pressures are induced by this wave in a metal such as copper.

The evolution of the Mach detonation wave is analyzed beginning with its formation. The possibility that a stationnary state be reached is shown, if the conditions of incidence are themselves stationnary.

1. **Introduction.** — On admet généralement que l'onde de détonation est constituée d'une onde de choc se propageant dans l'explosif, suivie d'une zone de dimensions finies dans laquelle les réactions chimiques initiées par le front de choc fournissent l'énergie nécessaire à l'entretien de l'onde de choc. Si le front de choc initiateur présente un point anguleux, d'angle convenable, une onde de Mach prendra naissance au sein de l'explosif, et les réactions chimiques se développeront dans un milieu plus comprimé que par un front de choc normal : il y a lieu de penser que les paramètres hydrodynamiques de la détonation, vitesse D et pression p, seront alors plus élevée dans la zone couverte par l'onde de Mach que ceux de l'onde de détonation normale. Cette onde de détonation particulière et localisée constitue une onde de détonation de Mach.

Nous décrivons dans le présent article trois cas expérimentaux où nous avons observé la formation d'une onde de détonation de Mach et analysé quelques-unes de ses propriétés :

— sa vitesse élevée, et l'évolution de cette vitesse ;

— les pressions de choc induites dans un milieu inerte ;

— les conditions d'une onde de détonation de Mach stationnaire ;

— la recherche d'une vitesse maximum.

L'explosif utilisé est une hexolite classique, dont la vitesse de détonation normale est de 8,1 mm/μs.

2. **Premier cas d'observation : Onde de détonation cissoïdale.** — La création d'un point anguleux dans l'onde de détonation peut être obtenue en « désadaptant » les constituants d'une lentille explosive à onde plane, c'est-à-dire en provoquant un retard Δt_0 dans l'axe de la lentille par rapport aux bords. L'onde de détonation transmise par une telle lentille à la cartouche d'explosif principal a la forme d'une cissoïde, et pour une valeur convenable de Δt_0, le phénomène de Mach apparaît.

Nous l'avons observé, pour des cartouches de diamètre 100 mm, à partir de $\Delta t_0 = 3$ μs [2].

Les mesures suivantes ont été faites dans ces conditions d'initiation :

a) Diagramme de marche de l'onde de détonation de Mach. — La cartouche d'explosif a une longueur L que l'on fait varier (*fig.* 1). L'arrivée de l'onde de détonation sur la face terminale est marquée par la forte luminosité de l'air emprisonné entre la cartouche et un disque de plexiglas placé au contact. La trace lumineuse, enregistrée à l'aide d'une caméra à fente, présente une partie centrale plane, de largeur Δx, en retard de Δt sur la partie périphérique de l'onde de détonation : cette partie plane constitue la zone d'action de l'onde de Mach (photo. 1). Sachant que l'onde de détonation a une vitesse $D_0 = 8{,}1$ mm/μs sur les bords de la cartouche, on peut tracer le diagramme de marche de la partie centrale plane en portant le retard Δt mesuré pour chaque longueur L au-dessus de la droite de pente D_0 (graphique 1). En différentiant ce diagramme, on obtient une courbe donnant approximativement la variation de la vitesse D de l'onde de détonation de Mach en fonction de la longueur L d'explosif parcourue (graphique 2). Lors de l'apparition du phénomène de Mach, soit vers $L = 30$ mm la vitesse D a une valeur élevée, supérieure à 11 mm/μs, puis elle décroît et tend vers la valeur D_0.

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphys:01966002703-4019000

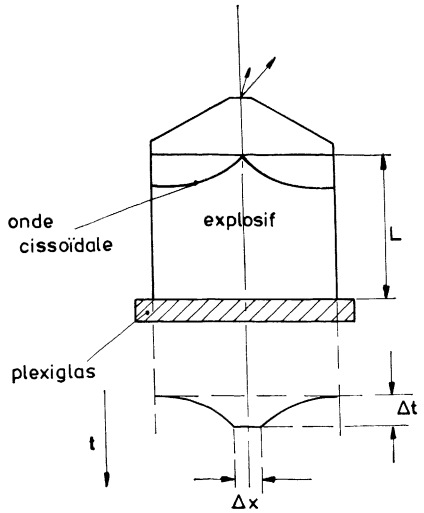
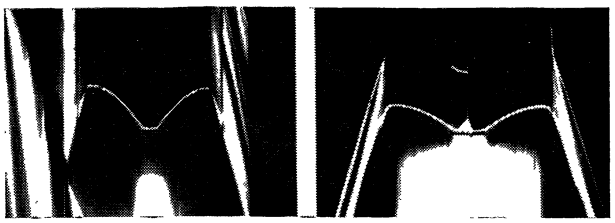
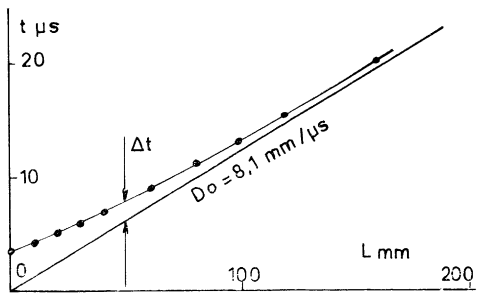


FIG. 1.



PHOTOGRAPHIE N° 1. $L = 60$ mm.

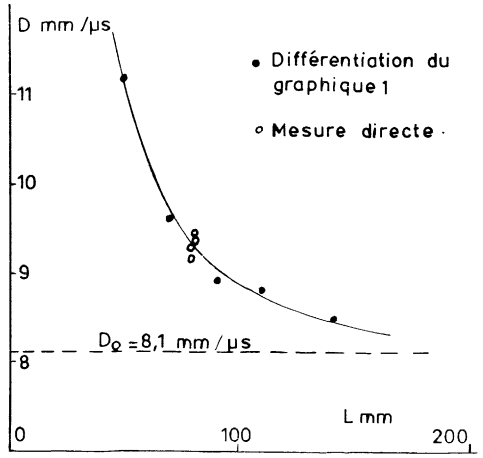
PHOTOGRAPHIE N° 2. $L = 90$ mm.



GRAPHIQUE 1. — Diagramme de marche de l'onde de détonation de Mach.

Lorsque la longueur L de la cartouche augmente, la largeur Δx de la zone de Mach croît quasi linéairement. Nous avons constaté que cette croissance de Δx était indépendante du diamètre de la cartouche : pour $L = 160$ mm par exemple, la largeur de la zone de Mach vaut 27 mm dans des cartouches de 100 et 200 mm de diamètre.

b) MESURE PRÉCISE DE LA VITESSE DE DÉTONATION DE MACH. — Cette mesure est faite à l'aide



GRAPHIQUE 2. — Vitesse de détonation de Mach en fonction de la distance.

d'un cylindre de plexiglas, de longueur 20 mm, noyé dans l'explosif (*fig.* 2). Les traces lumineuses observées par une caméra à fente (photo. 2) donnent le temps de parcours de la détonation le long du cylindre. Celui-ci a été placé dans la zone de Mach,

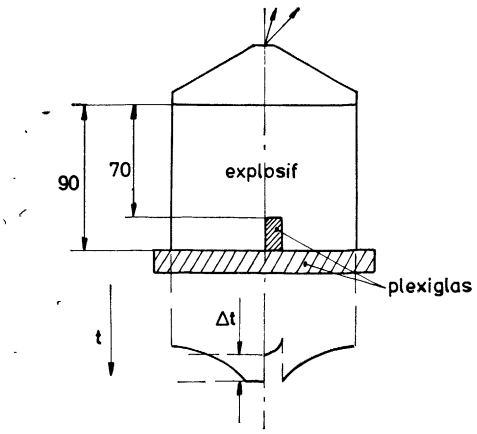


FIG. 2.

au voisinage de l'axe de la cartouche. Les valeurs de D obtenues ainsi directement sont portées sur le graphique 2, et présentent un bon accord avec celles déduites de la différentiation du diagramme de marche.

c) PRESSION DE CHOC INDUITE DANS UN MILIEU INERTE. — Sur la face terminale de la cartouche d'explosif, on place un disque de cuivre (*fig.* 3) d'épaisseur 3 mm. La surface libre de ce disque est polie et éclairée, lors de l'expérience, par un flash. L'arrivée de l'onde de choc sur la surface libre du cuivre provoque une rotation de celle-ci, donc une

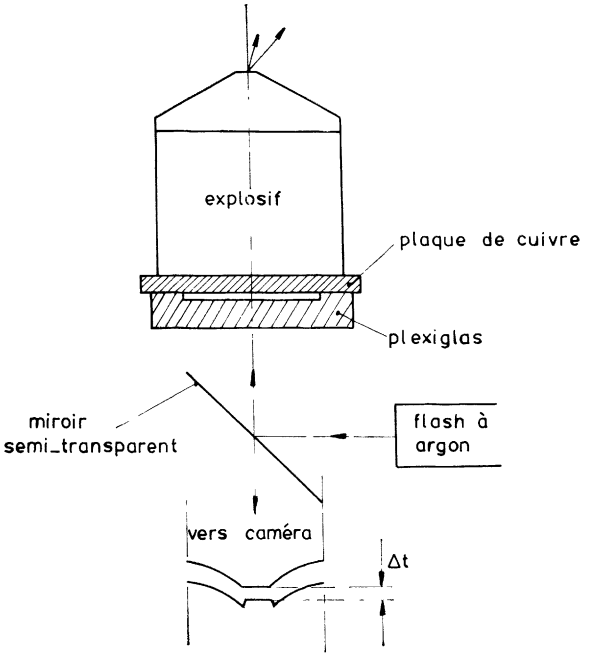


FIG. 3.

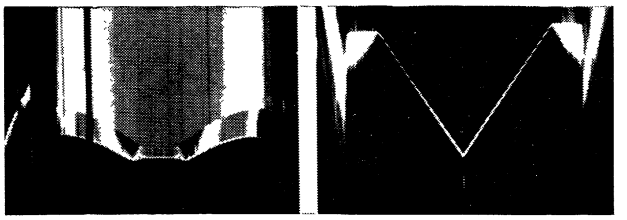
diminution de la lumière réfléchie vers la caméra : la forme de l'onde de choc est ainsi fidèlement enregistrée (photo 3). On distingue nettement, l'arrivée des ondes de choc incidentes, l'onde de Mach, les points triples. On distingue également les ondes de choc réfléchies issues des points triples, car celles-ci provoquent une rotation en sens inverse de la surface libre, renvoyant à nouveau la lumière du flash vers la caméra.

D'autre part, une lame de plexiglas disposée parallèlement à 1 mm du disque de cuivre enregistre l'arrivée de chaque élément de la surface libre de celui-ci, grâce à la luminosité de l'air ionisé lors de l'impact.

Ce dispositif permet de mesurer la vitesse de surface libre du cuivre dans la zone de Mach et en dehors de celle-ci, donc de connaître les pressions de choc induites en différents points.

Les essais ont été faits avec des cartouches de longueur 80 mm, pour lesquelles on sait (graphique 2) que la vitesse de détonation de Mach est de 9,3 mm/μs. En dehors de la zone de Mach, la pression de choc dans le cuivre est de l'ordre de 450 kilobars. Dans la zone de Mach, la pression mesurée lors de sept expériences fut de 1,06 ± 0,03 mégabar. Il y a donc un contraste très net entre l'action de l'onde de détonation de Mach et l'onde de détonation normale.

3. **Second cas d'observation : Rencontre de deux ondes de détonation planes.** — Les expériences précédentes mettent en évidence l'existence du phénomène de Mach dans la détonation et sa propriété d'induire des pressions de choc élevées. Afin d'analyser de façon plus précise les conditions de sa formation, le dispositif suivant a été expérimenté (*fig.* 4).



PHOTOGRAPHIE N° 3. $\beta = 80$ mm ; cuivre $L = 3$ mm.

PHOTOGRAPHIE N° 4. $\beta = 90°$, $H = 57$ mm.

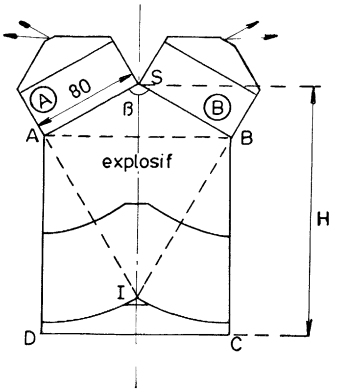


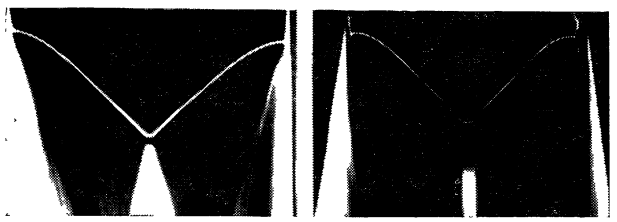
FIG. 4.

Deux ondes de détonation planes sont créées dans deux cartouches parallélépipédiques A et B, et atteignent simultanément les deux faces SA et SB d'un prisme constitué de l'explosif étudié (SA = SB = 80 mm). Ce prisme est prolongé par une cartouche parallélépipédique ABCD.

Les ondes incidentes font entre elles l'angle β, imposé par construction, qui reste constant en principe jusqu'au point I, la distance SI étant égale à SA/cos β/2. Au-delà du point I, l'interaction se fait entre les ondes cylindriques issues des arêtes A et B, et l'angle d'incidence augmente. On peut donc observer les conditions de formation et l'évolution de l'onde de Mach en faisant varier l'angle β et la hauteur H.

a) FORMATION DE L'ONDE DE MACH EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE β. — On observe l'arrivée de l'onde de détonation sur la face terminale CD par le même procédé que celui décrit plus haut. Les angles β = 60°, 90°, 95°, 100°, 110°, 120° et 150° ont été utilisés, et pour chacun plusieurs valeurs de H.

Le phénomène de Mach apparaît, dès la base du prisme AB, pour tous les angles supérieurs ou égaux à 100°. Pour $\beta = 90°$, il n'apparaît pas. Pour $\beta = 95°$ il est apparu dans un cas sur deux. Les photos 4, 5 et 6 représentent des enregistrements obtenus pour $\beta = 90°$, $\beta = 100°$ et $\beta = 120°$. Nous admettons que l'angle critique de formation, pour l'explosif étudié et dans les conditions d'initiation décrites, est compris entre 95° et 100°.



PHOTOGRAPHIE N° 5. $\beta = 100°$, $H = 80$ mm.

PHOTOGRAPHIE N° 6. $\beta = 120°$, $H = 80$ mm.

b) ÉVOLUTION DE L'ONDE DE MACH. — A l'aide des enregistrements obtenus en observant l'arrivée de l'onde sur la face terminale, il est possible de restituer la forme de cette onde à l'instant où la zone de Mach atteint l'abscisse H. On a fait varier H de 80 à 315 mm pour $\beta = 120°$. Dans ce cas, la distance SI vaut 160 mm.

On constate alors que, tant que les ondes incidentes n'ont pas atteint le point I, c'est-à-dire tant que H est inférieur ou égal à 160 mm, la vitesse de l'onde de Mach reste constante et égale à sa valeur déduite d'un calcul de cinématique simple :

$$D_{\text{Mach}} = D_0 / \sin \beta / 2. \qquad (1)$$

En l'occurrence, pour $\beta = 120°$, cette vitesse vaut 9,35 mm/μs.

En outre, la largeur de la partie plane centrale Δx reste également constante et égale à 4,5 mm tant que le point I n'est pas atteint.

Au-delà du point I, l'angle d'incidence entre les deux ondes latérales augmente continûment. On constate alors que la vitesse de l'onde de Mach décroît et que sa largeur Δx croît linéairement avec H, pour atteindre 14 mm à $H = 315$ mm.

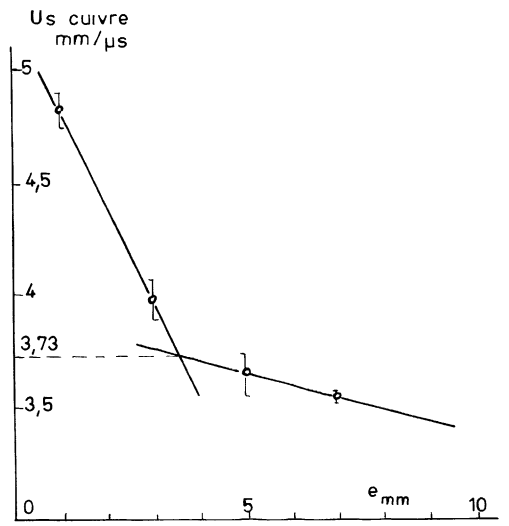
Ces expériences mettent en évidence une propriété intéressante de l'onde de détonation de Mach : celle d'être stationnaire lorsqu'elle est formée par deux ondes de détonation elles-mêmes stationnaires, c'est-à-dire planes et formant entre elles un angle constant. Il y a là une différence importante avec l'onde de Mach obtenue dans les milieux inertes par intersection de deux ondes de choc. La stabilité de l'onde de détonation de Mach est liée à la stabilité de l'onde de détonation simple et peut relever de la même cause : la nature réactive du milieu et la localisation du phénomène d'interaction au niveau de la zone de réaction chimique.

c) MESURE DE LA PRESSION DE DÉTONATION DANS L'ONDE DE MACH. — Une tentative de mesure de pression de détonation a été faite en utilisant une méthode décrite par Duff et Houston [1] : variation de la vitesse de surface libre d'une plaque métallique en fonction de son épaisseur. L'onde de Mach est créée par le prisme de la figure 4, où $\beta = 100°$ et $H = 90$ mm. Elle se trouve donc dans le régime stationnaire. Sur la face terminale CD, est placée une plaque de cuivre d'épaisseur e. La mesure de sa vitesse de surface libre se fait par la méthode décrite en 2.*c*, et l'on obtient des enregistrements du type de la photo 7. La distance séparant la lame de plexiglas et la surface du cuivre est choisie assez petite pour éviter le phénomène d'accumulation de choc. Les valeurs obtenues sont portées dans le tableau I et sur le graphique 3 ; elles représentent les moyennes de 4 ou 8 mesures.

TABLEAU I

VITESSE DE SURFACE LIBRE u_s DU CUIVRE EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR e

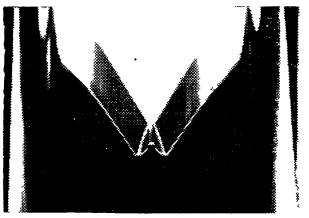
e mm	u_s mm/μs
1	4,82 ± 0,08
3	3,98 ± 0,10
5	3,65 ± 0,10
7	3,54 ± 0,02



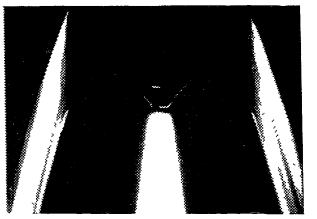
GRAPHIQUE 3. — Vitesse de surface libre du cuivre en fonction de l'épaisseur.

Sur le graphique 3, on remarque une décroissance rapide de u_s, suivie d'une décroissance plus lente. Selon le schéma décrit par Duff et Houston,

on est tenté de conclure à l'existence d'un point CJ dans l'onde de détonation de Mach, ce point étant défini comme point de réaction chimique complète, et à déterminer ses caractéristiques à partir du point d'intersection des deux droites que l'on peut tracer sur le graphique 3. Ce point a pour valeur u_s = 3,73 mm/μs, et correspond à une pression de choc de 1,09 mégabar dans le cuivre. En admettant que la valeur du coefficient polytropique Γ des gaz de détonation soit la même derrière l'onde de Mach et derrière une onde plane, on obtient pour l'onde de détonation de Mach de vitesse D = 10,6 mm/μs, une pression CJ de détonation de l'ordre de 700 kilobars (au lieu de 280 kilobars pour l'onde de détonation normale).



Photographie n° 7.
$\beta = 100°$,
$H = 90$ mm,
cuivre $L = 3$ mm.



Photographie n° 8.
$x = 30$ mm.

4. **Troisième cas d'observation : Recherche d'une vitesse maximum.** — Nous avons montré en 2.*a* que la vitesse de détonation D pouvait prendre une valeur très élevée lors de l'apparition du phénomène de Mach. Un dispositif simple, employant une faible quantité d'explosif, a été mis au point pour étudier l'onde de Mach au voisinage de l'instant où elle est formée (*fig.* 5).

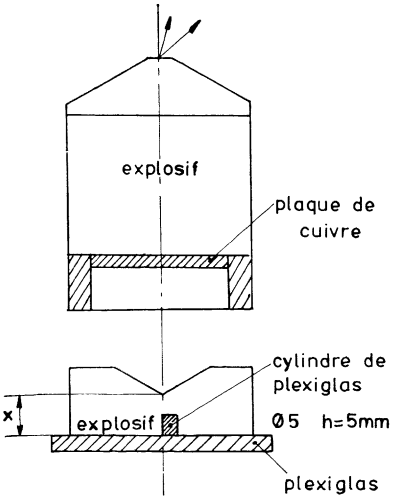


Fig. 5.

Une plaque de cuivre est projetée avec une vitesse V sur un bloc de l'explosif étudié, dans lequel on a usiné une cavité conique. A l'extérieur de l'évidement conique, l'onde de détonation initiée par impact est plane, et à l'instant t elle se trouve en C (*fig.* 6). A l'intérieur de l'évidement, la plaque projetée atteint successivement les points de la génératrice du cône, et à l'instant t le point d'impact est en A.

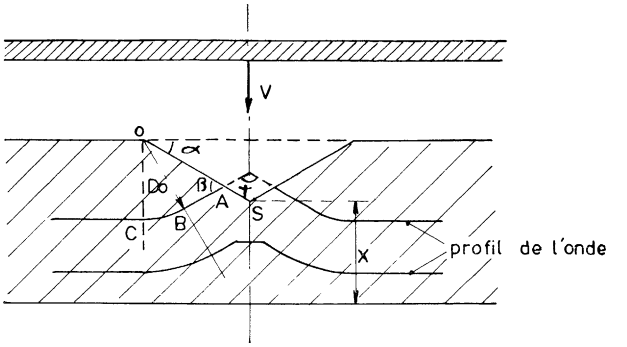


Fig. 6.

Si la vitesse V était faible, l'onde de détonation issue de O arriverait en A avant l'impact de la plaque de cuivre, et l'élément d'onde CA serait circulaire. Mais si $V > D_0 \sin \alpha$, on voit aisément que cet élément d'onde comprend une partie droite AB, dont l'inclinaison β sur la génératrice du cône est donnée par :

$$\sin \beta = (D_0/V) \sin \alpha.$$

Nous avons donc créé dans la cible explosive une onde de détonation conique, tronquée, d'angle au sommet ψ, défini par :

$$\psi = \pi - 2(\beta - \alpha).$$

Si l'angle ψ a une valeur supérieure ou égale à 100°, cette onde donne lieu, à partir du sommet S, à la formation d'une onde de détonation de Mach.

En faisant varier la distance x séparant le sommet S de la face terminale, on peut observer la phase initiale du phénomène. La vitesse de détonation est mesurée, sur une base de 5 mm, par la méthode du cylindre de plexiglas décrite en 2.*b*. Le photo 8 montre un enregistrement obtenu dans le cas $x = 30$ mm.

Dans nos expériences, la vitesse d'impact V était de 3,5 mm/μs. L'angle α valait (21,8)°. D'où un angle β de (59,4)° et un angle ψ voisin de 105°. Le tableau II donne les valeurs mesurées de D : elles représentent la valeur moyenne de D entre les abscisses x et $(x - 5)$ mm.

S'il n'y avait pas de phénomène de Mach dans l'axe du bloc de l'explosif, le sommet de l'onde de détonation conique se propagerait avec une vitesse donnée par la relation (1), soit ici 10,2 mm/μs. Outre l'existence d'une zone plane centrale, on

TABLEAU II

VITESSE DE DÉTONATION DE MACH D ENTRE LES ABSCISSES x ET $(x - 5)$ mm

x mm	D mm/μs
10	14,31
20	11,84
30	10,29
40	9,85
50	9,31
60	8,79
70	8,25

mesure des vitesses nettement supérieures. Ceci prouve que la détonation de Mach est bien apparue, et que lors de sa formation elle jouit d'une vitesse initiale très élevée, qui lui permet de s'élargir rapidement.

Nota : Le dispositif de la figure 5 a été également utilisé pour induire des ondes de Mach dans le cuivre, le bloc d'explosif à évidement conique étant remplacé par un bloc identique, mais en cuivre. On a mesuré ainsi des pressions de choc de 4 mégabars, la charge d'explosif utilisée n'étant que de 1,5 kg. Ceci confirme que la description du phénomène donnée ci-dessus est correcte.

5. **Conclusion.** — Confrontant les résultats des paragraphes 3 et 4, on peut décrire ainsi le développement de l'onde de détonation de Mach :

— une phase de formation, où la vitesse, initialement très élevée, décroît rapidement. Corrélativement, la zone de Mach s'élargit ;

— une phase stationnaire, où la vitesse de détonation reste constante ainsi que la largeur de la zone. Bien entendu, cette phase n'existe que si les conditions d'incidence sont stationnaires ;

— une phase de retour à la détonation normale, qui se développe dès que les conditions d'incidence ne sont plus stationnaires.

Par ailleurs, l'onde de détonation de Mach offre un intérêt particulier pour l'obtention de pressions de choc élevées dans les milieux inertes sous un volume réduit.

Manuscrit reçu le 13 août 1965.

RÉFÉRENCES

[1] DUFF (R. E.) et HOUSTON (E.), *J. Chem. Physics* 1955, **23**, 1268.

[2] THOUVENIN (J.) et ARGOUS (J. P.), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 1964, **258**, 1725.