REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE

Revue Phys. Appl. 20 (1985) 51-62

FÉVRIER 1985, PAGE 51

Classification
Physics Abstracts
07.10 — 46.20

Méthodes expérimentales de détermination du comportement sous choc et en détente du polystyrène et du lithium à l'aide d'un canon à gaz léger

J. M. Lezaud, C. Le Drian, J. Martineau et S. Roux

C.E.A., Centre d'Etudes de Vaujours, B.P. 7, 77181 Courtry, France

(Reçu le 16 février 1984, révisé les 18 juin et 17 septembre, accepté le 12 octobre 1984)

Résumé. — A l'aide d'un canon à gaz léger à deux étages, on étudie le comportement sous choc et en détente du lithium et du polystyrène. A cet effet, on utilise les méthodes d'adaptation d'impédance et d'accumulation de choc associées aux diagnostics de chronométrie électronique et d'interférométrie Doppler Laser. Dans le cas du polystyrène, on met en évidence la présence d'un changement de phase au voisinage des 200 kbars. On détermine également l'isentrope de détente du lithium. A cette occasion, la méthode d'adaptation d'impédance appliquée à l'argon comprimé montre la nécessité d'une connaissance approfondie d'une équation d'état prenant en compte les phénomènes d'ionisation.

Abstract. — Using two stage light gas gun, we study under shock-loading lithium and polystyrene behaviours. Compression and release isentrope are determined. For this purpose impedance matching and progressive acceleration of free surface technics associated with electronics chronometry and Doppler Laser Interferometry are used. In the case of polystyrene experiments a change in the adiabat is evidenced at about 200 kbars. Lithium isentrope measurements are also obtained. We note that the matching impedance technics applied to the compressed argon gas needs a good knowledge of its equation of state taking into account ionization phenomena.

1. Introduction.

Pour l'étude du comportement sous choc des matériaux, les moyens expérimentaux utilisés généralement en détonique sont de deux ordres : les générateurs à explosifs, les canons. L'intérêt d'un canon par rapport à tout autre moyen de générer un choc réside dans la connaissance détaillée du choc engendré. Cet avantage est essentiel lorsqu'il s'agit de réaliser des expériences de physique nécessitant une grande précision. D'autre part, la gamme de pression accessible au moyen d'un explosif est limitée. Seul un lanceur à gaz, à deux étages, permet d'obtenir des pressions élevées (50 à quelques centaines de GPa). Néanmoins, même à basse pression, les qualités du canon à gaz léger par rapport aux sollicitations par explosif le destinent tout naturellement, entre autres études, à la connaissance et à l'affinement des corps de référence utilisés à la détermination des caractéristiques de choc de matériaux nouveaux [1-7].

Cet article a pour objet la présentation de deux méthodes expérimentales appliquées à l'étude du comportement sous choc et en détente de deux matériaux légers, le lithium et le polystyrène en utilisant comme générateur de choc un canon à gaz léger à deux étages.

2. L'installation canon à gaz léger à deux étages.

Rappelons brièvement le principe et le fonctionnement d'un canon à gaz léger à deux étages (Fig. 1). Un gaz léger (hélium ou hydrogène) préalablement comprimé dans un tube de compression par un piston mu par une charge de poudre se détend après rupture d'un diaphragme à pression calibrée dans un tube de lancement en accélérant un projectile qui vient impacter la cible placée à l'intérieur d'une chambre de mesures dans laquelle a été fait un vide primaire.

3. Les diagnostics.

Les paramètres fondamentaux nécessaires à la compréhension du comportement hydrodynamique des matériaux soumis à des chocs intenses ne sont pas toujours directement accessibles à la mesure. Seuls le sont la vitesse de l'onde de choc dans le matériau, la vitesse de surface libre, la vitesse du projectile qui engendre le choc. Les diverses méthodes expérimentales, mises en œuvre, utilisent des dispositifs électroniques et optiques.

3.1 LES MESURES ÉLECTRONIQUES DE VITESSE. — Les mesures de vitesse sont faites par chronométrie

Fig. 1. — Schéma de principe et de fonctionnement du canon à gaz léger à deux étages.

[The two stage light gas gun. General description.]

ultra-rapide (temps de résolution 100 ps) entre deux plans parallèles de référence dont la distance est connue avec une précision de quelques microns. L'incertitude relative sur les mesures de vitesse est de l'ordre de 1 %. Selon le domaine de pression de fonctionnement et les précisions requises, divers types de sondes sont disponibles. On distingue les sondes dites « actives » à fonctionnement autonome et les sondes dites « passives » qui nécessitent l'utilisation d'un circuit de décharge (Fig. 2).

Fig. 2. — Principe de la mesure chronométrique à l'aide de sondes passives.

[Velocity measurements with electronics probes.]

Les sondes actives à céramique ferro-électrique polarisée soumises à un choc génèrent une variation de potentiel due soit à l'effet piézo-électrique (pour une pression inférieure à 0,2 GPa environ), soit à l'effet de dépolarisation (pour les pressions supérieures). Ces sondes sont utilisées pour des pressions de fonctionnement de quelques dizaines de GPa.

Les sondes passives, en général, sont constituées de deux conducteurs isolés par un diélectrique. La continuité électrique entre les conducteurs est assurée par le choc. Suivant la nature du diélectrique et du choc, les phénomènes mis en jeu pour l'établissement du court-circuit sont différents et vont fortement influencer les performances. Parmi ces sondes, on distingue :

— les microcontacts à capuchon qui sont de structure coaxiale et dont le diélectrique est de l'air. Ils sont utilisés pour des pressions de fonctionnement supérieures à 25 GPa. Pour ce type de microcontacts, le jitter est de l'ordre de 1,7 ns pour une pression de 50 GPa ;

— les microcontacts à capuchon où l'air est remplacé par du mylar (épaisseur de quelques microns). Ils sont également utilisés pour des pressions de fonctionnement supérieures à 25 GPa. Le jitter est de 0,8 ns pour une pression de 50 GPa.

Ce sont les trois types de microcontacts utilisés dans nos expériences.

3.2 LES MESURES OPTIQUES DE VITESSES. — La mesure de vitesse par microcontacts suppose une vitesse constante entre les deux plans de mesure. Cette hypothèse est largement vérifiée pour la mesure de vitesse du projectile et la mesure du temps de propagation d'une onde de choc. Dans le cas où l'on veut suivre au cours du temps l'évolution de la vitesse, on utilise une chaîne d'Interférométrie Doppler Laser (I.D.L.) [8-10].

Le principe de la mesure de vitesse par I.D.L. consiste à enregistrer la longueur d'onde $\lambda_v(t)$ d'un

faisceau réfléchi par un mobile animé d'une vitesse $v(t)$ et de la comparer à la longueur d'onde initiale λ_i du faisceau incident d'un laser à argon ionisé ($\lambda_i = 514,5 \text{ nm}$; $P = 5 \text{ W}$) [11]. La relation :

$$\frac{\lambda_v(t) - \lambda_i}{\lambda_i} = \frac{2 v(t)}{c}$$

permet d'en déduire directement la vitesse (c est la célérité de la lumière). La chaîne d'enregistrement est constituée par un interféromètre Fabry-Pérot d'ouverture variable [12], associé à une caméra électronique à fente (Fig. 3a). La différence de chemin optique due à l'inclinaison naturelle du faisceau par les lames du Fabry-Pérot crée un système d'interférences annulaires. La variation du diamètre des anneaux, fonction de la variation de la longueur d'onde au cours du temps, est enregistrée sur film photographique (interférogramme).

Fig. 3a. — Interférométrie Doppler Laser.

[Doppler Laser Interferometry.]

Fig. 3b. — Schéma d'un interférogramme.

[Interferogram.]

L'interférogramme est constitué d'une partie statique (mobile au repos : image de λ_i) et d'une partie dynamique (mobile en vitesse : image de $\lambda_v(t)$). La vitesse des anneaux d'interférences est donnée par (Fig. 3b) :

$$V(t_1) = \frac{\lambda_i C_0}{4 e_{PF}} \left(p + \frac{D^2(t_1) - S_1^2}{S_2^2 - S_1^2} \right) \text{ avec :}$$

- p : nombre entier correspondant à l'ordre d'interférence,
- S_1 ; S_2 : diamètre des anneaux en statique,
- D : diamètre d'un anneau en dynamique,
- e_{PF} : distance entre lames du Fabry-Pérot,
- C_0 : célérité de l'onde lumineuse dans le milieu de propagation.

4. Les expériences.

4.1 CAS DU POLYSTYRÈNE.

4.1.1 *Comportement sous choc.* — La méthode choisie de détermination des paramètres de choc est celle dite d'adaptation d'impédance reposant sur le principe d'égalité des pressions et des vitesses matérielles à l'interface de deux milieux [13]. Le diagramme $P(u)$ pression-vitesse matérielle (Fig. 4) explicite ce principe dans le cas où le matériau de référence en cuivre se détend à partir d'un point de choc B connu sur le matériau à étudier, en l'occurrence le polystyrène.

Fig. 4. — Méthode d'adaptation d'impédance en compression.

[Impedance matching method for compression.]

L'isentrope de détente du cuivre que l'on suppose confondue avec la symétrique de sa polaire et la mesure de la célérité du choc dans le polystyrène permettent de déterminer l'état du choc C dans le polystyrène. Les expériences relatives au comportement sous choc du polystyrène se sont limitées à préciser une zone présumée de transition de phase ou d'anomalie de compressibilité, zone devant se situer au voisinage de 200 kbars [14]. Le schéma de principe du montage expérimental est représenté sur la figure 5. Le projectile d'un diamètre 80 mm et d'épaisseur 6 à 10 mm, lancé par le canon à gaz léger à deux étages, induit dans la cible un choc soutenu. La cible est constituée d'un disque en tantale d'épaisseur 3 mm, sur la face arrière duquel sont disposés 3 secteurs S_1 , S_2 , S_3 respectivement en tantale, en cuivre et en aluminium de même épaisseur 3 mm. Derrière cette série de 3 secteurs est accolé le disque en polystyrène. Un ensemble de micro-contacts placés aux différents interfaces et répartis sur différents rayons permet de repérer l'instant de passage de l'onde de choc, donc d'en mesurer la célérité U . Ce dispositif suppose connues les équations

Fig. 5. — Montage et disposition expérimentale des 3 secteurs transmetteurs de choc.

[Experimental arrangement using three shock transmitters.]

d'état des matériaux de référence constituant les 3 secteurs.

Cette équation d'état est de la forme $U = a + bu$. Les coefficients a et b des matériaux utilisés ainsi que leur masse spécifique ρ_0 mesurée sont donnés dans le tableau ci-dessous [15-17] :

	a	b	$\rho_0 \text{ g/cm}^3$
Al	5 380	1,337	2,702
Cu	3 967	1,4926	8,950
Ta	3 414	1,2	16,730

4.1.2 Comportement en détente. — On dispose de plusieurs possibilités de détermination d'une isentrope de détente d'un matériau.

Une première possibilité consiste à détendre le matériau à étudier à partir de sa polaire de choc (connue) sur des matériaux de référence d'impédance plus basse. Le schéma (Fig. 6) en explicite le principe dans le diagramme $P(u)$. La connaissance des corps M et M', ainsi que la mesure des célérités d'onde induite

Fig. 6. — Méthode d'adaptation d'impédance en détente.

[Impedance matching method for release isentrope determination.]

dans ces matériaux par le corps étudié permettent de déduire deux points S_1 et S_2 d'une isentrope de détente issue du point de choc P. La figure 6 montre que cette méthode n'est applicable que si les matériaux de référence ont une impédance de choc inférieure à celle du corps étudié. Dans le cas du polystyrène qui a déjà une impédance de choc relativement faible, nous sommes conduits à utiliser une autre méthode qui repose sur le principe d'accumulation de choc [18], (Thouvenin, J., communication privée).

Cette deuxième possibilité consiste à accélérer un matériau Q par le matériau N à étudier placé derrière lui, d'impédance de choc plus faible, la face avant étant par convention celle située du côté de la face d'impact, la face arrière celle opposée à la face d'impact. Le schéma de principe du montage est représenté figure 7. Un matériau de référence d'im-

Fig. 7. — Montage de la cible dans le cas de la méthode d'accumulation de choc.

[Target arrangement for release isentrope determination by D.L.I.]

pédance Z_M au contact duquel est placé le matériau à étudier d'impédance Z_N (polystyrène) est soumis à un choc engendré par l'impact d'un projectile lancé par le canon à gaz léger. Le matériau Q (cliquant mince de quelques dizaines de microns d'épaisseur constitué d'un alliage or-nickel) d'impédance $Z_Q > Z_N$ est collé sur la face arrière du matériau N à étudier. Le cliquant dont la surface libre est réfléchissante est éclairé par un faisceau laser. La mesure consiste à suivre, au cours du temps, la mise en vitesse de ce cliquant. Rappelons brièvement, en s'aidant des diagrammes $x(t)$ et $P(u)$, l'analyse du phénomène (Fig. 8). L'onde de choc traverse le milieu N

Fig. 8. — Analyse du phénomène d'accumulation de choc.

[Cumulative shock acceleration.]

(polystyrène) pour le porter dans l'état (P_1, u_1) de la polaire du polystyrène. A l'instant t_1 cette onde rencontre l'interface N/Q (polystyrène-or-nickel) en portant le clinquant dans l'état (P_2, u_2) . A la surface libre de Q (clinquant) un train d'ondes de détente centré en S remonte le milieu Q, le faisant passer à l'état S ($P = 0, u = u_s$) le long de l'isentrope S_Q de Q. Ce train d'ondes de détente se transmet d'une part au milieu N (polystyrène), d'autre part se réfléchit à l'interface N/Q en un train d'ondes de compression puisque $Z_Q > Z_N$. Le milieu N évolue donc le long de son isentrope de détente (S_N) tandis que le milieu Q soumis à un double train d'ondes de compression et de détente évolue vers un état C (P_3, u_3) intersection de l'arc d'isentrope (S_Q) avec (S_N). Le processus ci-dessus se continue ainsi en portant les milieux N et Q dans les états successifs D (P_4, u_4), E (P_5, u_5), etc... Les points C, D, E, etc... sont déterminés à partir des mesures de la vitesse de surface libre u_s, u'_s, u''_s de Q au moyen de la chaîne I.D.L.

L'interférogramme obtenu permet le tracé de l'évolution de la vitesse de surface libre du clinquant en fonction du temps (Fig. 9) et en particulier la détermination des points u_s, u'_s, u''_s ...

Cette méthode nécessite évidemment la connaissance du matériau Q qui est ici un alliage or-nickel. Cet alliage à 90 % d'or et à 10 % de nickel à une masse spécifique de 17,110 g/cm³. Son équation d'état a été prise sur la forme $U_{m/s} = 3\,150 + 1,579\,u$ (M. Leroy, communication privée), où U et u ont les mêmes significations que précédemment. Les résultats expérimentaux issus de cette méthode sup-

Fig. 9. — Evolution de la vitesse de surface libre du clinquant en fonction du temps.

[Time history of the thin foil free surface velocity.]

posent de plus que la détente isentropique de ce matériau suit une courbe symétrique semblable de sa polaire de choc.

4.1.3 Les résultats. — Les conditions de choc ont été choisies de façon à encadrer la zone de pression de 200 kbars.

i) Résultats obtenus par chronométrie. — Ces résultats caractérisent plus particulièrement le comportement sous choc du polystyrène. Les tableaux ci-dessous résument les valeurs des paramètres de choc, obtenues en rappelant que seules sont mesurées expérimentalement la vitesse du projectile, la célérité de l'onde de choc U , ainsi que la vitesse de surface libre u_s , les autres paramètres étant déterminés à partir des considérations théoriques exposées précédemment et des équations fondamentales de l'hydrodynamique.

1^{re} expérience

Nature du projectile	Vitesse du projectile V_p m/s	Matériau générateur du choc	Polystyrène					
			ρ_0 g/cm ³	U m/s	u m/s	P kbar	$\frac{\rho_0}{\rho}$	u_s m/s
Ta	3 180	A9	1,052	6 598	3 537	245,5	0,464	I.D.L.
		Ta	—	6 543	2 867	197	0,562	5 490
		Cu	—	6 583	2 960	205	0,550	5 813

2^e expérience

Nature du projectile	Vitesse du projectile V_p m/s	Matériau générateur du choc	Polystyrène					
			ρ_0 g/cm ³	U m/s	u m/s	P kbar	$\frac{\rho_0}{\rho}$	u_s m/s
Cu	4 560	A9	1,052	7 844	4 103	338,6	0,477	I.D.L.
		Ta	—	6 934	3 554	259	0,487	6 271
		Cu	—	7 347	3 774	291,7	0,486	7 479

3^e expérience

Nature du projectile	Vitesse du projectile V_p m/s	Matériau générateur du choc	Polystyrène					
			ρ_0 g/cm ³	U m/s	u m/s	P kbar	$\frac{\rho_0}{\rho}$	u_s m/s
Ta	2 504	A9	1,050	6 374	2 891	193,5	0,546	I.D.L.
		Ta	—	5 782	2 278	138,3	0,606	4 284
		Cu	—	6 056	2 538	161,4	0,581	4 956

Nota : La notation I.D.L. à la première ligne de la colonne u_s signifie que c'est dans la zone du disque de polystyrène soumis au choc inducteur de l'A9 qu'a été faite la mesure par interférométrie Doppler Laser.

Les figures 10, 11 et 12 traduisent l'ensemble des résultats en coordonnées (P, u) (U, u) et $P(\rho_0/\rho)$. La zone d'anomalie de compressibilité apparaît très nettement sur l'adiabatique dynamique $P(\rho_0/\rho)$. On constate en effet pour une pression se situant autour de 180 kbars, un début de changement de courbure qui se poursuit jusqu'à environ 240 kbars. Cette transition apparaît également sur la courbe $U(u)$. Nos valeurs expérimentales dans cette zone montrent un léger décalage par rapport à celles publiées en référence [14]. Il est en effet possible que le « Styrolux » de masse spécifique $\rho_0 = 1,046$ g/cm³ dont il est question en référence [14] ne soit pas rigoureusement identique au matériau utilisé pour nos expériences.

Fig. 10. — Polaire de choc du polystyrène.

[Shock Hugoniot of polystyrene.]

ii) Résultats obtenus par interférométrie. — Ces résultats caractérisent le polystyrène en détente. Sur les trois expériences, seules les première et troisième ont donné des interférogrammes exploitables, dont la figure 13 donne un enregistrement (troisième expérience). Un tel interférogramme permet de déterminer l'évolution de la vitesse u_s de la surface libre

Fig. 11. — Diagramme célérité d'onde de choc, vitesse matérielle du polystyrène.

[Shock wave velocity versus material velocity for the polystyrene.]

du clinquant or-nickel et en particulier la suite des paliers de vitesse $u_s, u'_s, u''_s, \dots$. On remarquera sur la figure 13 pour chacun des enregistrements, l'un statique, l'autre dynamique, la présence de deux interférogrammes. En effet, pour lever une indétermination pouvant se présenter lorsque la vitesse à mesurer évolue de façon discontinue et que son ordre de grandeur n'est pas défini (c'est le cas présent), il y a nécessité d'utiliser deux interféromètres Fabry-Pérot d'ouverture différente après avoir séparé le faisceau laser de retour en deux faisceaux donnant chacun un interférogramme.

Dans ces deux expérimentations, les pôles de

Fig. 12. — Adiabatique dynamique du polystyrène.
[Polystyrene adiabat.]

INTERFEROGRAMMES STATIQUES
(clinquant immobile)

INTERFEROGRAMMES DYNAMIQUES
(clinquant en mouvement)

Fig. 13. — Enregistrement à la caméra électronique d'interférogrammes.
[Interferogram recordings.]

premier choc dans le polystyrène sont définis par les valeurs suivantes :

Première expérience :
Célérité du choc : $U = 6\,598$ m/s (valeur mesurée)
Vitesse matérielle : $u = 3\,537$ m/s (déduite de l'équation d'état de l'aluminium pour la méthode d'adaptation d'impédance)
Pression de choc : $P = 245,5$ kbars (déduite de l'équation $P = \rho_0 Uu$)
(ρ_0 masse spécifique du polystyrène).

Troisième expérience :
 $U = 6\,374$ m/s
 $u = 2\,891$ m/s
 $P = 193,5$ kbars .

La connaissance des paliers de vitesse mesurées sur les interférogrammes dont les valeurs sont respectivement pour les première et troisième expériences :

1^{re} : $u_s = 2\,710 - 3\,490 - 4\,080 - 4\,420 - 4\,600 - 4\,750$ m/s
3^e : $u_s = 1\,352 - 2\,123 - 2\,655 - 3\,019 - 3\,305$ m/s

ainsi que la connaissance de l'isentrope de détente de l'alliage or-nickel assimilée à la symétrique de la polaire de choc permet de déduire les points correspondants des isentropes de détente. Le tableau ci-dessous résume les valeurs obtenues :

Première expérience		Troisième expérience	
u m/s	P kbars	u m/s	P kbars
1 355	1 227	676	488
3 100	251	1 737,5	248
3 785	182,7	2 389	163
4 250	99,6	2 837	107
4 510	50,8	3 162	83
4 675	42		

Les figures 14 et 15 représentent les isentropes de détente correspondantes (la figure 14 montrant le tracé détaillé correspondant à la troisième expérience). La difficulté d'exploitation de ces résultats réside dans le fait que le polystyrène ainsi choqué voit son impédance de choc varier au cours de la compression. Ce phénomène semble d'autant plus marqué que le pôle de premier choc (point T', Fig. 15) se situe au-delà de la zone de transition. On constate en effet qu'à plus basse pression (point T, Fig. 15) le polystyrène retrouve un comportement plus conforme aux prévisions. Il est important de noter toutefois que la méthode d'accumulation de choc utilisant le diagnostic d'Interférométrie Doppler Laser n'est pas strictement rigoureuse en ce qui concerne la détermination du point de l'isentrope de détente (état de second choc P_2, u_2). En effet, on devrait plutôt considérer le phénomène de détente d'un point de premier choc. Cet inconvénient incombe au principe même de la méthode de mesure. Un des palliatifs utilisés pour l'application de cette méthode consisterait à avoir des points de premier et de second choc très voisins. Dans l'expérience qui nous occupe, nous avons voulu essentiellement avoir une confirmation de la présence d'un phénomène de changement de phase plutôt qu'une mesure absolue discutable de l'isentrope de détente. En effet, la figure 15 montre que les isentropes (D_N et D'_N) déterminées par leur pôle de 1^{er} choc (point T et T' sur la polaire

Fig. 14. — Détermination d'une isentrope de détente du polystyrène par la méthode d'accumulation de choc (troisième expérience).

[Polystyrene isentrope determination by cumulative shock acceleration.]

Fig. 15. — Isentropes de détente du polystyrène (méthode d'accumulation de choc).

[Polystyrene isentrope : experimental results.]

du polystyrène) et le point à pression nulle ($P = 0$, $u = u_g$) sont très voisins l'un de l'autre puisque leur pôle de pressions respectives 205 et 197 kbars sont très voisins. Par contre, l'isentrope (S_N) est très éloignée de (D_N) et (D'_N) ; en effet, si les pôles de premier choc (points T et T' sur la polaire du polystyrène) sont de l'ordre de 200 kbars, le pôle du second choc (point B sur la polaire de l'or-nickel) est à une pression voisine de 500 kbars.

4.2 CAS DU LITHIUM. — Les expérimentations relatives au lithium sont limitées au comportement en détente de ce matériau, son comportement sous choc ayant fait l'objet de plusieurs notes internes aux Centres d'Etudes de Vaujours et d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine.

4.2.1 Première série d'expérimentations. — On détend le lithium sur un matériau de référence, d'impédance

plus faible. Le lithium étant un métal léger, le matériau de référence choisi est l'argon. En comprimant initialement l'argon dans une enceinte, on fait varier de façon discrète son impédance de choc dans la limite inférieure de celle du lithium. La figure 16 représente le schéma de principe du dispositif expérimental. Un système de microcontacts à capuchon caractérise le choc dans le lithium alors que les sondes à céramique, seules sondes susceptibles de répondre aux basses pressions, caractérisent le choc dans l'argon.

Fig. 16. — Montage expérimental utilisant une enceinte à argon comprimé.

[Experimental arrangement using compressed argon chamber.]

4.2.2 Seconde série d'expérimentations. — Cette seconde série d'expérimentations repose sur le même principe « d'accumulation de choc », déjà décrit précédemment dans l'étude en détente du polystyrène, le lithium remplaçant le polystyrène.

4.2.3 Les résultats.

i) Détente dans l'argon comprimé. — La résolution du système d'équations décrivant la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie nécessite la connaissance de l'équation d'état de l'argon. Dans notre domaine expérimental ($T > 10^4$ K, $p > 10^8$ Pa), l'équation d'état type gaz parfait avec ionisation [$p = (1 + \alpha) \rho r T$] ne nous semble pas réaliste. Nous avons mis l'équation d'état sous la forme $P(\rho) = P^0(\rho) + P^+(\rho)$, $P^0(\rho)$ caractérisant le comportement des atomes et $P^+(\rho)$ celui des électrons et les interactions coulombiennes.

L'expression de $P^0(\rho)$ que nous avons utilisée est celle de F. H. Lee [19] :

$$P^0(\rho) = 4,19 \times 10^7 P_s \text{ (en Pascal)}$$

avec $P_s = \sum_{i=0}^5 A_i \rho_s^{i+1} + B \rho_s^{11}$ $\rho_s = 5,94 \times 10^{-4} \rho$
où ρ est en kg/cm³

$A_0 = T_s = T/119,8$ où T est en K

$$A_1 = 3,629 T_s^{3/4} - 5,3692 T_s^{1/4} - 3,4921/T_s^{1/4}$$

$$A_2 = 7,2641 T_s^{1/2} - 13,1594 + 18,698/T_s^{1/2}$$

$$A_3 = 10,4924 T_s^{1/4} - 18,5235/T_s^{1/4} - 35,5049/T_s^{3/4}$$

$$A_4 = 11,459 + 17,074/T_s^{1/2} + 31,8151/T_s$$

$$A_5 = -8,4205/T_s^{3/4} - 11,1953/T_s^{5/4}$$

$$B = 2,17619/T_s^{3/2}.$$

L'expression de $P^+(\rho)$ est :

$$P^+(\rho) = \alpha \rho r T - \frac{1}{24 \pi} \frac{1}{\sqrt{kT}} \left(\frac{2 \alpha \rho e^2}{\varepsilon_0 m_A} \right)^{3/2}$$

avec $\varepsilon_0 = \frac{1}{36 \pi \cdot 10^9}$, $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C, $m_A = 6,63 \times 10^{-26}$ kg, $k = 1,3 \times 10^{-23}$ Jdg⁻¹, α étant le degré d'ionisation. Limitant l'ionisation à la première, α est la solution de l'équation $\rho/m_A \alpha^2 + K \alpha - K = 0$, où K est la constante d'équilibre de la réaction $A \rightleftharpoons A^+ + e$, définie par

$$K = 2 \frac{Q_1(T)}{Q_0(T)} \left(\frac{2 \pi m_e k T}{h^3} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{-\chi}{kT}\right)$$

avec $Q_1(T)$ et $Q_0(T)$ les fonctions de partition de l'air et de l'atome neutre, $m_e = 0,9 \times 10^{-30}$ kg, $h = 6,66 \times 10^{-34}$ J.s et χ le potentiel d'ionisation.

Quant à l'équation d'état du lithium, deux formes donnant des résultats voisins dans le domaine considéré de pression ont été utilisées

$$U = 3\,473 + 1,27 u \quad 115 < P < 215 \text{ kbars} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$U = 3\,940 + 1,092 u \quad 100 < P < 500 \text{ kbars} \quad \text{Eq. (2)}$$

(Eq. (1) : R. Droux. Note interne, Centre d'Etudes de Vaujours)

(Eq. (2) : P. Lalle-A. Le Bihan. Note interne, Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine).

D'un même pôle de détente voisin de 123-124 kbars, 5 expériences ont donné 5 points d'une isentrope de détente. La figure 17 traduit dans le diagramme $P(u)$ les résultats obtenus. On constate que cette courbe de détente se situe légèrement en dessous de la symétrique de la polaire par rapport à l'axe vertical passant par le pôle P. Toutefois l'absence du point ($P = 0$, $u = u_s$) nous interdit le tracé complet de cette courbe. Notons qu'un inconvénient de cette méthode réside dans le fait qu'il est difficilement envisageable d'obtenir plus d'un point de l'isentrope de détente par expérience.

ii) Détente en utilisant le principe « d'accumulation de choc ». — La méthode expérimentale est identique à celle exposée pour l'étude en détente du polystyrène ; l'interférogramme permet de suivre l'évolution de la vitesse u_s de surface libre du clinquant et en particulier de déterminer la suite des valeurs u_s , u'_s , u''_s , etc...

Le pôle de premier choc a les caractéristiques suivantes :

Célérité de choc : $U = 6\,888$ m/s (valeur mesurée)

Vitesse matérielle : $u = 2\,689$ m/s (déduite de l'équation (1))

Fig. 17. — Isentrope de détente du lithium dans l'argon comprimé.
[Isentrope of lithium in compressed argon.]

Pression de choc : 99 kbars (déduite de l'équation $P = \rho_0 U u$)
 ρ_0 masse spécifique de lithium = 0,534 g/cm³.

Les valeurs des paliers de vitesse du clinquant (830 - 1 470 - 2 415 - 2 760 m/s) déduites de l'interférogramme ainsi que la connaissance de l'isentrope de détente de l'alliage or-nickel assimilée à la symétrique de la polaire de choc permettent de déterminer cinq points correspondants de l'isentrope de détente du lithium issue du pôle de deuxième choc ($u = 415$ m/s, $P = 270,5$ kbars).

u m/s	415	1 150	1 730	2 202	2 587
P kbars	270,5	200,4	158,6	126,9	101,1

La figure 18 représente le tracé de cette isentrope. A noter que la partie de l'isentrope située dans le domaine des basses pressions et des grandes vitesses matérielles n'a pu être déterminée. En effet, le clinquant mince d'or-nickel se détériore au cours de la détente, la perte de réflectivité qui en résulte entraînant la perte du signal sur l'interférogramme.

Fig. 18. — Isentrope de détente du lithium (méthode d'accumulation de choc).
[Isentrope of lithium determined by the D.L.I. technique.]

5. Conclusion.

L'étude hydrodynamique du comportement sous choc des matériaux occupe une place importante en détonique. La qualification et la connaissance détaillée des caractéristiques des matériaux légers restent à acquérir. Cet état de fait tient tout particulièrement à l'absence de matériaux de référence de basse impédance. Ceci conduit le physicien à utiliser à la fois des méthodes de mesures plus sophistiquées (Interférométrie Doppler Laser, par exemple), ainsi que des matériaux dont on peut faire varier de façon discrète l'impédance, tels que l'argon. La nécessité de connaître de façon précise la nature de la sollicitation et d'assurer la meilleure planéité possible pour le choc engendré implique l'utilisation d'un lanceur. Les performances du Canon à Gaz Léger, utilisé dans ces expériences, permettent, de plus, de réaliser des montages complexes pouvant donner, dans certaines configurations, plusieurs points en compression ou en détente.

La précision des mesures, mentionnée sur les différentes courbes, est déterminée à partir de l'incertitude expérimentale due à la chronométrie et à la géométrie des montages et de l'incertitude théorique liée au choix des équations d'état. Les barres d'erreur sont données à titre indicatif et sont à considérer comme des valeurs moyennes.

Dans cet article, nous avons montré la faisabilité de ce type d'expérience sur le polystyrène et le lithium. On a confirmé, dans le cas du polystyrène, l'existence d'une zone présumée de transition de phase ou d'anomalie de compressibilité au voisinage de 200 kbars. Avec l'utilisation d'une enceinte à argon comprimé, on a pu déterminer une isentrope de détente du lithium dans la gamme des basses pressions, c'est-à-dire en dessous de 150 kbars. L'utilisation de la méthode de l'accumulation de choc dans le cas du lithium nous donne des informations sur son comportement en détente dans une gamme supérieure, c'est-à-dire entre 250 et 100 kbars. Nous envisageons par la suite, tout en complétant l'instrumentation, d'appliquer ces méthodes au comportement hydrodynamique de corps poreux.

Remerciements.

Nous tenons à remercier R. Chéret qui a soutenu dès l'origine les études en détonique effectuées à l'aide du canon à gaz léger, H. Bernier à l'origine de la conception du lanceur. Nous sommes reconnaissants envers M. Pinègre et F. Chaissé pour leur contribution au choix d'une équation d'état de l'argon et C. Fauquembergue pour son aide dans l'exploitation des résultats. Nous exprimons également notre reconnaissance à P. Andriot, P. Chapron, B. Laurent et R. Tcherniaeff pour la mise au point du diagnostic interférométrique, ainsi que l'équipe de soutien de l'installation, en particulier D. Hombourger et J. Trouchenko.

Note aux épreuves. — Des conversations avec Marvin Ross du Lawrence Livermore National Laboratory se référant à l'un de ses articles [20] nous permettent d'apporter une explication complémentaire concernant la position de l'isentrope de détente du lithium dans l'argon comprimé par rapport à la symétrie de sa polaire. En effet, en dessous de 100 kbars le lithium en détente passerait en fusion ce qui expliquerait le décrochement au-dessous de la symétrie de la polaire qui apparaît dans nos résultats expérimentaux (Fig. 17).

Par ailleurs, dans la méthode d'adaptation d'impédance, nous avons fait l'hypothèse, pour tous les matériaux de référence, que leurs isentropes de détente étaient symétriques de leurs polaires correspondantes. Des expériences récentes, postérieures à celles rapportées dans le présent article, ont montré, dans le cas du cuivre, que cette hypothèse pouvait être prise en défaut, son isentrope étant située en début de détente au-dessous de la polaire. Ces résultats ont fait l'objet de la communication citée en référence [21]. Une des interprétations possibles est qu'une onde élastique de détente entraîne une baisse de pression sans mise en mouvement notable du matériau. Bien que ces résultats ne concernent pas le même domaine expérimental, on peut considérer qu'un même phénomène peut se produire sur d'autres matériaux. En conséquence, un tel comportement augmenterait de façon significative les barres d'erreurs expérimentales.

Bibliographie

- [1] BERNIER, H., Proc. 24th Aeroballistic Range Association. Tullahoma (1973).
- [2] MITCHELL, A. C. and NELLIS, W. J., Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-84239 (1980).
- [3] PEREZ, E., Proc. 4th International Symposium on ballistics, Monterey (1978).
- [4] CHERET, R., ANDRIOT, P., CHAPRON, P., LE DRÉAN, C., LEZAUD, J. M., LOICHOT, R., MARTINEAU, J., OLIVE, F., *Am. Ins. Phys. Conf. Proc.* **78** (1982)/626
- [5] CHARTAGNAC, P. and JIMENEZ, B., Proc. 34th Aeroballistic Range Association, Williamsburg (1983).
- [6] MITCHELL, A. C. and NELLIS, W. J., *Rev. Sci. Instrum.* **52** (1981) 347.
- [7] BERNIER, H., VALADON, M., ZEMBRI, M. et LEZAUD, J. M., Proc. 8th AIRAPT, Uppsala (1981).
- [8] JOHNSON, P. M. and BURGESS, T. J., *Rev. Sci. Instrum.* **39** (1968) 1100.
- [9] BARKER, L. M., *Exp. Mech.* **5** (1972) 209.

- [10] DURAND, M., LAHARRAGUE, P., LALLE, P., LE BIHAN, A., MORVAN, J., PUJOLS, H., *Rev. Sci. Instrum.* **48** (1977) 275.
 - [11] ANDRIOT, P., CHAPRON, P., LAURENT, B. and OLIVE, F., 5th Int. Cong. Optoelectronics in Engineering Proc. (Berlin, Eidelberg, New York) 1981, p. 146.
 - [12] ANDRIOT, P., CHAPRON, P., LE DRÉAN, C., OLIVE, F., Cléo'81 Proc. (Washington, D.C.) (1981) 132.
 - [13] ALTSHULER, L. V., KRUPNIKOV, K. K., LEDENEV, B. N., ZHUCHIKHIN, V. I. and BRAZHNİK, M. I., *Sov. Phys. JETP* **7** (1958) 606.
 - [14] STANLEY, P. Marsh Editor, L.A.S.L. Shock Hugoniot Data, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London (1980).
 - [15] VAN THIEL, M., *Compendium of shock wave data*, UCRL 50108, Vol. **1**, Rev. 1 (1977).
 - [16] ISBELL, W. M., SHIPMAN, F. H., JONES, A. H., Materials and Structures Lab. General Motors Technical Center, Warren, Michigan Report M.S.L. 68-13-AD 72-1920 (1968).
 - [17] KINSLOW, R. (Ed.), *High-Velocity Impact Phenomena* (Academic Press, New York-London) 1970.
 - [18] BERGER, J., VIARD, J. (Dunod, Paris) 1962.
 - [19] REE, F. H., *J. Chem. Phys.* **73** (1980) 5401.
 - [20] YOUNG, D. A. and ROSS, M., *Phys. Rev. B* **29** (1984) 682.
 - [21] European High Pressure Research Group (EHPRG), 22^e rencontre, 11-14 sept. 1984, Aussois (France).
-