

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

Nouvelles expériences sur le choc de deux billes

par E. MULLER,

Lycée Nationalisé, 38150 Roussillon.

Dans un premier article consacré à la vérification des lois du choc et publié dans le B.U.d.P. n° 624, nous nous sommes limités au cas où la masse du projectile était supérieure à celle de la cible. Cette limitation était surtout une commodité technique : nous étions ainsi sûrs que, dans le référentiel du laboratoire, la déviation du projectile lors du choc serait inférieure à 90°. Depuis nous avons perfectionné notre appareillage de façon à permettre l'étude, par la même méthode, d'un choc où le projectile est dévié de plus de 90°, c'est-à-dire dans des cas où nous dirons qu'il y a *recul du projectile*. Les expériences décrites ci-après concernent des chocs où la bille-projectile a une masse inférieure ou égale à celle de la bille-cible.

Pour l'étude théorique du choc de deux billes, pour la justification de la technique de mesure des vitesses, pour la description générale de l'appareillage et pour sa mise en œuvre, le lecteur est prié de se reporter à l'article précédent (1); dans la suite, lorsque nous ferons référence à une formule ou à un résultat précis donnés dans cet article, nous n'indiquerons que le paragraphe et la page du B.U.d.P.

1. CONSIDERATIONS THEORIQUES A PROPOS DU REcul DU PROJECTILE.

Pour comprendre les modifications que nous avons apportées à l'appareillage primitif, il est bon de préciser les conditions théoriques et les valeurs possibles du recul du projectile. Rappelons d'abord que, pour l'étude expérimentale que nous faisons, il est nécessaire :

(1) B.U.d.P. n° 624, mai 1980, p. 1053.

- que les billes aient après le choc des vitesses horizontales,
- qu'elles quittent leurs appuis immédiatement après le choc,
- qu'elles viennent frapper le fond de la caisse.

S'il y a possibilité de recul, il faut donc que le choc ait lieu à l'extrémité d'une sorte de promontoire avançant suffisamment au-dessus de la caisse; autrement dit, la construction d'un dispositif bien adapté implique la connaissance de ce que nous appellerons la **portée de recul**, c'est-à-dire la *portée du projectile après choc frontal élastique*.

1. a) **Conditions du recul.** Nous utiliserons les mêmes notations que dans le premier article (2). Dans le référentiel du laboratoire, juste avant et juste après le choc, les vitesses du projectile, de masse M , sont \vec{V}_0 et \vec{V}_1 ; celles de la cible, de masse m , sont $\vec{0}$ et \vec{V}_2 ; toutes sont horizontales. Il y a recul, si : $\vec{V}_0 \cdot \vec{V}_1 < 0$; l'expression de ce produit scalaire est donnée à la fin du paragraphe 2 (p. 1058); elle fait intervenir :

ϑ , angle de déviation du projectile dans le référentiel du centre d'inertie,

α (compris entre 0 et 1), coefficient caractérisant la non-élasticité du choc ($\alpha = 1$ pour un choc élastique, $\alpha = 0$ pour un choc parfaitement mou).

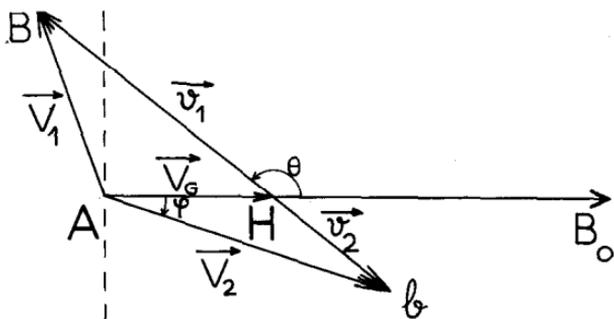


Fig. 1

(2) Dans toutes les expériences décrites dans cet article, la masse du projectile est supérieure à celle de la cible; c'est pourquoi nous avons désigné la première par M et la seconde par m . Tous les calculs théoriques et leurs résultats sont valables, quelle que soit la valeur du rapport M/m ; pour pouvoir les utiliser commodément, nous garderons cette notation, de sorte que, dans la grande majorité des chocs considérés ici, $M < m$; toutefois, dans le paragraphe final : $M = m$.

La condition de recul est donc :

$$\vec{V}_0 \cdot \vec{V}_1 = \frac{V_0^2}{M + m} (M + \alpha \cdot m \cdot \cos \vartheta) < 0$$

$$\Rightarrow M + \alpha \cdot m \cdot \cos \vartheta < 0.$$

Même dans le cas le plus favorable, celui d'un choc frontal où $\cos \vartheta = -1$, il n'y a recul que si $M < \alpha \cdot m$; puisque $0 \leq \alpha \leq 1$, cela implique deux conditions :

$$M < m, \quad \alpha > M/m.$$

Autrement dit, pour que le projectile recule après le choc, il faut :

- que sa masse soit inférieure à celle de la cible,
- que le choc ne soit pas trop mou; plus la masse du projectile se rapproche de celle de la cible, moins le choc doit être inélastique.

1. b) **Portée de recul.** Si les masses du projectile et de la cible sont données, c'est le *choc frontal élastique*, $\cos \vartheta = -1$ et $\alpha = 1$, qui donne le recul le plus important; on a alors :

$$\vec{V}_1 = -\frac{m - M}{m + M} \cdot \vec{V}_0.$$

Prenons l'exemple de deux billes d'acier dont les diamètres sont 16 et 18 millimètres; leurs masses, en unités arbitraires valant 2,4 grammes (§ 3. a, p. 1058), sont :

pour le projectile (\varnothing 16 mm)	$M = 7,$
pour la cible (\varnothing 18 mm)	$m = 10.$

Si la *portée* (§ 2, p. 1057) correspondant à la vitesse initiale \vec{V}_0 est celle qui nous a donné satisfaction dans les expériences antérieurement décrites, soit $AB_0 = 50$ cm, la *portée de recul* est :

$$\overline{AB} = -\frac{m - M}{m + M} \cdot \overline{AB}_0 = -\frac{10 - 7}{10 + 7} \times 50 = -8,8 \text{ cm.}$$

Il est relativement facile de réaliser une avancée globale de 9 centimètres et nous décrirons l'appareillage correspondant. Nous indiquerons plus sommairement un dispositif où l'avancée atteint 16 centimètres; il permet d'étudier les chocs d'une bille-projectile de 12 millimètres, $M = 3$, contre une bille-cible soit de 16 millimètres, $m = 7$, soit de 18 millimètres, $m = 10$, à condition toutefois de donner au projectile une vitesse initiale

plus faible, c'est-à-dire de choisir une portée AB_0 soit de 40 centimètres, soit de 30 centimètres ; en effet :

$$-\frac{7-3}{7+3} \times 40 = -16 \text{ cm ;} \quad -\frac{10-3}{10+3} \times 30 = -16,1 \text{ cm.}$$

1. c) **Position de la cible.** La droite passant par les centres des billes à l'instant du choc donne la direction dans laquelle est projetée la bille-cible, c'est-à-dire celle du vecteur \vec{V}_2 (§ 3. d, p. 1063, 2^e alinéa) ; cela conduit à considérer l'angle $(\vec{V}_0, \vec{V}_2) = \varphi$. Pour le recul, les cas les plus favorables sont ceux des *chocs élastiques*, où $\alpha = 1$. D'après la fig. 1, le triangle HAb est alors isocèle (voir aussi § 1. b, fig. 1, p. 1055) ; donc $\vartheta = \pi - 2\varphi$ et la condition du recul devient :

$$\cos \vartheta = -1 + 2 \sin^2 \varphi < -\frac{M}{m} \Rightarrow |\sin \varphi| < \sqrt{\frac{m-M}{2 \cdot m}}.$$

On utilise ce résultat pour placer la bille-cible de façon à avoir des chances d'observer un choc avec recul de la bille-projectile.

2. L'APPAREILLAGE.

Pour l'essentiel, l'appareillage est celui qui est décrit dans le premier article (§ 3. b, fig. 2 et 3, p. 1059 et 1060). Nous allons préciser les modifications apportées pour obtenir une *avancée globale* de 9 centimètres, ce qui convient à l'étude des chocs d'une bille-projectile de 16 millimètres contre une bille-cible de 18 millimètres.

2. a) **La plaque mélaminée.** Toujours horizontale, elle est main-

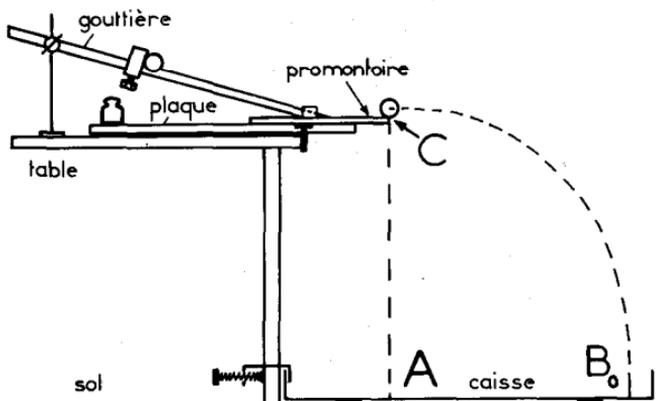


Fig. 2. — Sur la plaque, est figuré un lest, qui n'est indispensable que dans le cas d'une grande avancée (§ 4. a).

tenant de forme carrée, 40 centimètres de côté, et débordé de 4 centimètres du bord de la table (fig. 2). Ce dégagement a pour but d'augmenter la stabilité et la rigidité des cales promoteure et porte-cible, en diminuant l'importance de leurs porte-à-faux. Cette plaque repose sur quatre pieds, quatre rondelles de caoutchouc de même épaisseur, collées en des points convenables.

2. b) **La cale-promontoire.** Pièce nouvelle, elle est en *altuglas* (3)

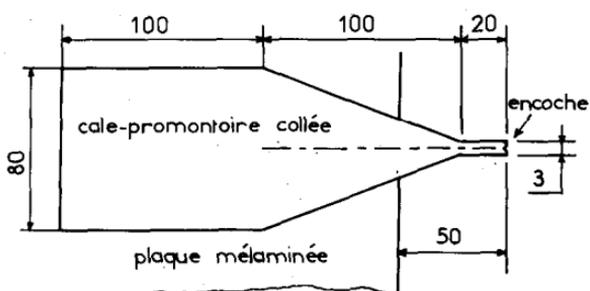


Fig. 3. — Le promoteur en *altuglas* de 6 mm et sa disposition.

blanc de 6 millimètres d'épaisseur et a la forme donnée par la fig. 3 ; sa partie terminale est un rectangle de 3 millimètres de largeur ; au milieu C de son extrémité, un trait de lime forme une petite encoche, où peut passer un fil à plomb.

Ce promoteur doit être collé à la plaque mélaminée dans une position bien déterminée : son extrémité C doit être à 5 centimètres en avant du bord de la plaque ; son plan de symétrie, qui passe par C, doit être perpendiculaire à ce bord. Pour effectuer la mise en place, il est commode de disposer d'une plaquette en *altuglas* transparent, sur laquelle on a dessiné la partie en porte-à-faux du promoteur (fig. 4) ; on l'applique contre le champ de la plaque mélaminée ; lorsque le promoteur est en bonne position, c'est-à-dire lorsque sa partie terminale est exactement au-dessus du dessin, on le colle par simple pression grâce à un adhésif double-face. L'avancée globale de l'extrémité C sur le bord de la table a la valeur voulue : $4 + 5 = 9$ centimètres.

(3) L'*altuglas*, méthacrylate de méthyle, est un matériau dont les propriétés mécaniques sont intéressantes et qui se travaille beaucoup plus facilement que l'acier inox. On trouve, dans les magasins d'applications industrielles des matières plastiques, des plaques coulées d'épaisseur de 2 à 8 millimètres, sauf 7 mm ; elles ont une très bonne planéité et une rigidité tout à fait satisfaisante. La forme voulue est aisément réalisée avec une scie à découpe.

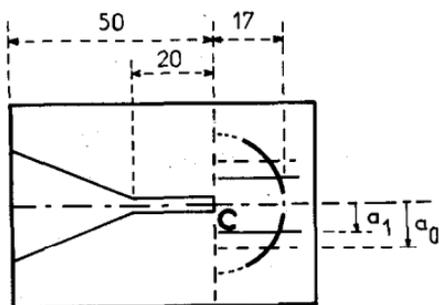


Fig. 4. — Plaquette de réglage.

A gauche :

Dessin de la partie en porte-à-faux de la cale-promontoire ; il sert à la mise en bonne position du promontoire avant fixation définitive.

A droite :

Demi-cercle de centre C servant au positionnement de la cible : le centre de la cuvette de la cale-porte-cible doit être au-dessus d'un des 2 arcs en trait plein.

a_1 : distance limite pour qu'il puisse y avoir recul du projectile,

a_0 : distance la plus favorable pour la précision des mesures.

2. c) **La gouttière en bois.** Décrite précédemment (§ 3. b, p. 1060, 2^e alinéa), servant de chemin de roulement à la bille-projectile lors du lancement, sa section de base, recouverte d'une feuille de caoutchouc, appuyant maintenant sur la cale-promontoire, cette gouttière doit occuper une position parfaitement déterminée, afin que la trajectoire du projectile passe par C. Pour trouver cette position, on opère par tâtonnements, en transposant le procédé qui avait permis de repérer le point où le projectile quittait l'appui de la plaque (§ 3. c, p. 1061, 1^{er} alinéa) : une petite feuille de papier-carbone gras permet d'enregistrer la trace de la bille sur l'altuglas du promontoire. Lorsque cette trace suit la ligne médiane de la partie terminale du promontoire, la gouttière occupe la position qui convient et on immobilise sa base par deux petites butées ; celles-ci sont en altuglas ; disposées latéralement de part et d'autre de la gouttière à moins de 10 centimètres de l'extrémité C, elles sont collées à la cale avec de l'adhésif double-face. Signalons que, une fois les butées collées, il est possible de parfaire le réglage de la trajectoire du projectile en déplaçant légèrement le trépied de fixation de la gouttière.

2. d) **La cale-porte-cible.** En altuglas blanc ou transparent de 5 millimètres d'épaisseur (4), elle est représentée par la fig. 5.

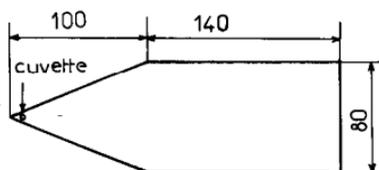


Fig. 5. — Cale porte-cible en altuglas.

La cuvette, destinée à immobiliser la bille-cible, a un diamètre de 1 à 1,5 millimètre; dans ce matériau tendre, elle s'obtient très facilement avec une fraise miniature à tête sphérique (5) maniée à la main.

2. e) **La caisse de réception.** Aucune modification ne la concerne, ni quant à sa position, ni quant à son mode d'emploi.

3. CHOC D'UN PROJECTILE CONTRE UNE CIBLE DE MASSE SUPERIEURE.

Le dispositif qui vient d'être décrit a été conçu, rappelons-le, pour l'étude du choc d'une bille-projectile de 16 millimètres contre une bille-cible de 18 millimètres, celle-ci étant initialement au repos.

3. a) **Réglage préliminaire.** On commence par repérer sur le fond de la caisse le point A, projection verticale de C, à l'aide d'un fil-à-plomb passant par l'encoche faite à l'extrémité du promontoire.

Aucun changement n'est à signaler pour le réglage de la vitesse de lancement du projectile, qui doit correspondre à la portée initiale choisie : $AB_0 = 50$ cm. On opère comme il est dit dans le premier article (§ 3. c, p. 1061, 2^e et 3^e alinéas).

3. b) **Positionnement de la cible.** On peut procéder comme dans les premières expériences (§ 3. d, fig. 4, p. 1062).

(4) Au moment du choc, les centres des deux billes doivent être dans le même plan horizontal (§ 3. a, p. 1059, 2^e alinéa); la différence, 1 mm, des épaisseurs de la cale-porte-cible et de la cale-promontoire compense exactement celle des rayons de la cible (\varnothing 18 mm) et du projectile (\varnothing 16 mm).

(5) Une telle fraise miniature se trouve, au détail dans le commerce, parmi les accessoires de mini-perceuse. La tête sphérique peut avoir un diamètre de 1,5 ou 2,4 millimètres; la tige a une longueur de 40 millimètres environ.

Toutefois, un autre procédé est préférable : on y utilise la plaquette en altuglas (fig. 4) ayant servi à la mise en place définitive de la cale-promontoire. Pour que le choc se produise à l'instant où le centre du projectile est au-dessus de C, il faut que le centre de la cible soit au-dessus d'un demi-cercle de centre C et dont le rayon est la somme des rayons des billes : $1/2 (d_1 + d_2) = 17$ mm. En fait, il y a des restrictions, car il faut éviter d'une part les chocs presque frontaux, d'autre part les simples frôlements ; autrement dit, la distance du centre de la cible à la droite médiane du promontoire doit être supérieure à 3 millimètres et inférieure à $17 - 2 = 15$ millimètres. Cela détermine deux arcs qu'on trace sur la plaquette (fig. 4). On applique cette plaquette contre le champ de la plaque mélaminée et on place la cuvette de la cale-porte-cible au-dessus d'un point de l'un des deux arcs dessinés.

Comme dans les cas étudiés antérieurement, l'expérience est plus précise si, après un *choc élastique*, les vitesses du projectile et de la cible ont la même norme (voir § 1. c, p. 1056 et § 3. d, p. 1063). Pour cela, la distance du centre de la cible à la trajectoire initiale du projectile doit être :

$$a_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} \times \frac{1}{2} \sqrt{3 - \frac{m}{M}} = 17 \times \frac{1}{2} \sqrt{3 - \frac{10}{7}} = 10,6 \text{ mm.}$$

Par ailleurs, il est très intéressant d'opérer dans des conditions où il peut y avoir recul du projectile. Cela implique (précédemment § 1. c) que la distance du centre de la cible à la trajectoire initiale soit inférieure à :

$$a_1 = \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot \sqrt{\frac{m - M}{2 \cdot m}} = 17 \times \sqrt{\frac{10 - 7}{2 \times 10}} = 6,6 \text{ mm.}$$

Il est commode que soient tracées sur la plaquette les droites correspondant à ces deux distances : a_0 et a_1 .

Notons enfin qu'il est facile de choisir *a priori* la direction dans laquelle sera projetée la cible ; en effet, cette direction est celle de la droite joignant les deux centres à l'instant du choc (fig. 6). Il suffit donc de mettre la cuvette de la cale-porte-cible dans le plan vertical passant par AC et un petit objet convenablement placé dans la caisse.

3. c) Vérification des lois du choc. Les photographies reproduites donnent les points d'impact observés dans le cas où les deux billes sont en acier dur 100 C 6 (fig. 7) et dans celui où elles sont en acier inox (fig. 8). On y voit :

- les impacts B_i ou D_i de la bille-projectile,
- les impacts b_i ou d_i de la bille-cible,

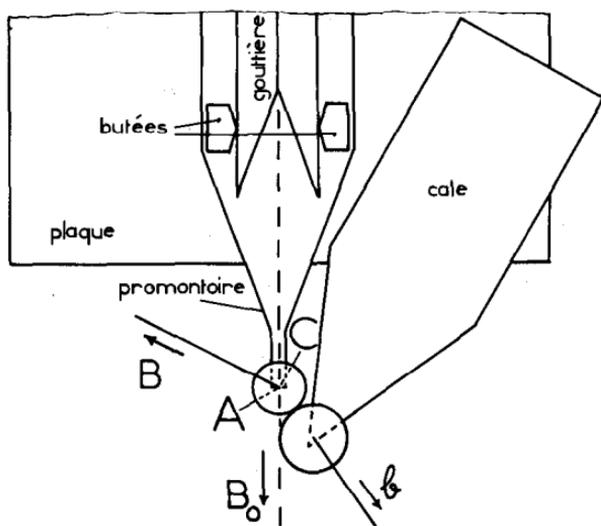


Fig. 6

- les points b'_i ou d'_i construits pour que $\overrightarrow{Ab'_i}$ ou $\overrightarrow{Ad'_i}$ soient les portées correspondant aux vitesses de la cible immédiatement après les chocs. Pour les corrections $\overrightarrow{b_i b'_i}$ ou $\overrightarrow{d_i d'_i}$, la justification et le mode opératoire sont les mêmes que dans les expériences antérieures (§ 4. a, p. 1065, 2^e alinéa). A l'instant du choc, le centre de la cible n'est pas en C, mais à 17 millimètres de ce point. Par contre, la bille-projectile quitte pratiquement son support en C; c'est pour que cette condition soit toujours satisfaite que le rectangle terminal du promontoire est étroit (3 mm).

Dans les deux cas, une première vérification des lois du choc est excellente : les droites $B_i b'_i$ ou $D_i d'_i$ passent par le point H, tel que :

$$\overrightarrow{AH} = \frac{M}{M + m} \cdot \overrightarrow{AB_0} = 0,41 \cdot \overrightarrow{AB_0}.$$

Pour la justification théorique, le lecteur se reportera au début du premier article (§ 1. b, fig. 1, p. 1054 à 1056).

Pour les billes en acier dur (fig. 7), les points B_i et les points b'_i sont respectivement voisins de deux cercles de centre H ayant des rayons presque égaux le premier à HB_0 et le second à HA. Cela prouve que les chocs sont pratiquement élastiques (voir article précédent § 4. a, p. 1066). Pour 6 expériences, celles numérotées 1, 2, 3, 11, 12, 13, il y a recul du projectile.

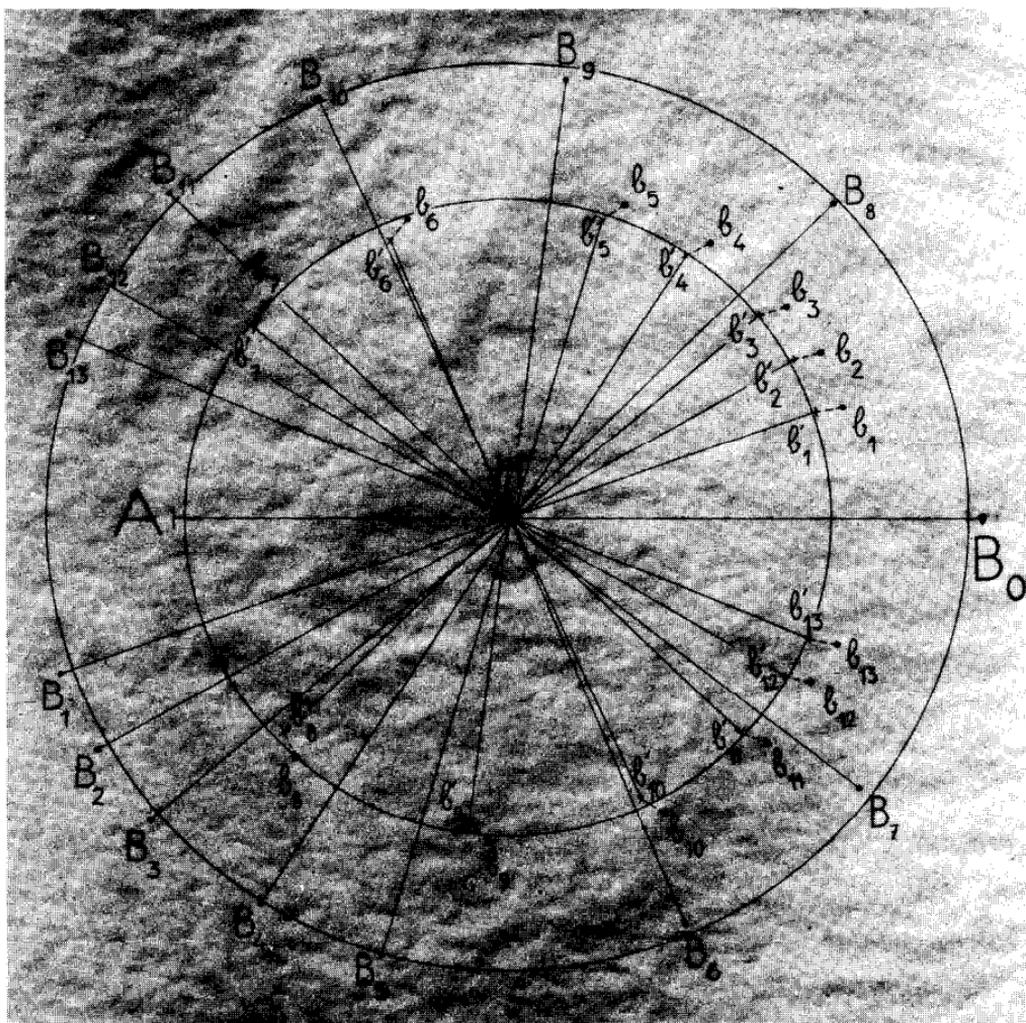


Fig. 7. — Choc de deux billes en acier dur 100 C 6 : recul :
 projectile : diamètre 16 mm,
 cible : diamètre 18 mm.

Pour les billes en acier inox (fig. 8), les chocs sont inélastiques : les points D_i d'une part, d_i d'autre part sont voisins de

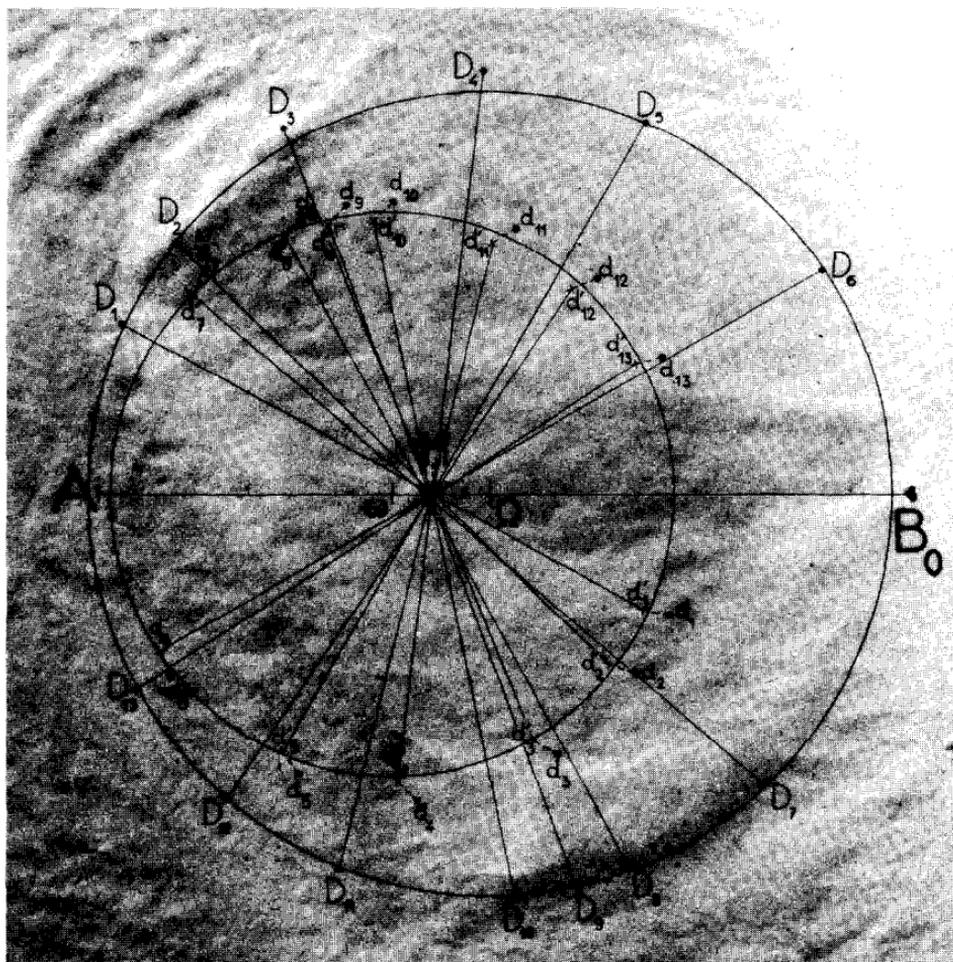


Fig. 8. — Choc de deux billes en acier inox 18/8 :

projectile : diamètre 16 mm,

cible : diamètre 18 mm.

deux cercles dont les centres sont respectivement Ω et ω , distincts de H. Signalons une détermination graphique (6) de ces centres : il suffit de tracer les médiatrices de quelques seg-

(6) Cette construction graphique est, bien entendu, valable dans le cas où la masse du projectile est supérieure à celle de la cible ; elle permet une détermination du coefficient K plus commode et plus précise que celle indiquée dans le premier article (p. 1070, renvoi 4).

ments $D_i D_j$ pour Ω , $d'_i d'_j$ pour ω (fig. 8 bis). On en déduit le coefficient que nous avons appelé K (§ 4. b, p. 1069) :

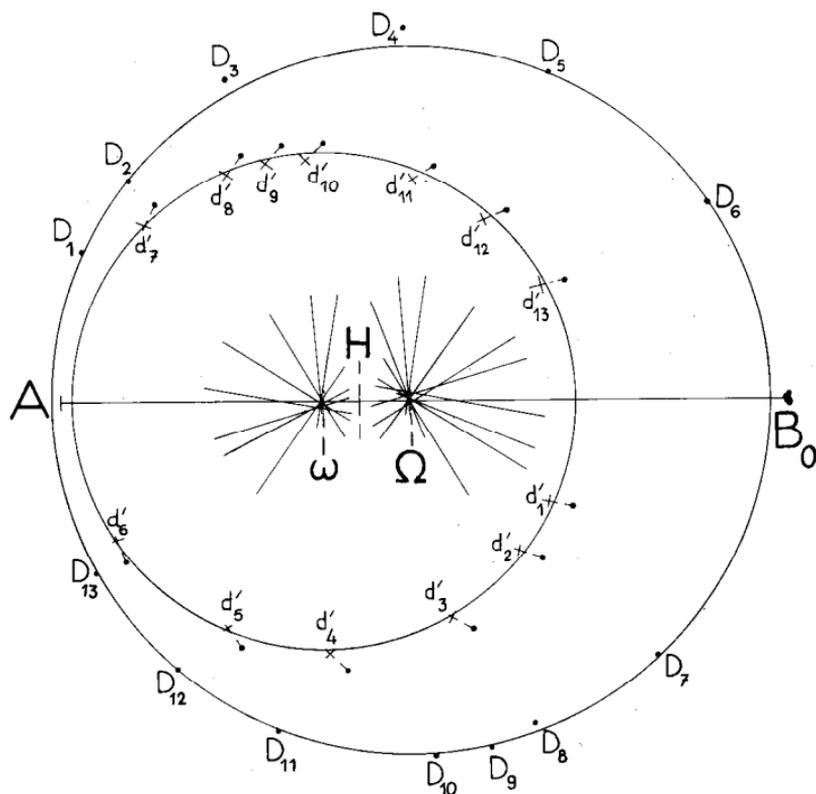


Fig. 8 bis. — Choc de deux billes en acier inox 18/8 :
projectile : diamètre 16 mm,
cible : diamètre 18 mm.

$$K = \frac{A\omega}{AH} = \frac{\Omega B_0}{HB_0} = 0,88.$$

Cette valeur explique qu'on n'observe pratiquement jamais de recul, car elle est trop proche de la limite théorique calculée ci-après :

$$B_0\Omega = K \cdot HB_0 = K \cdot \frac{m}{M+m} \cdot AB_0 > \frac{AB_0}{2}$$

$$\Rightarrow K > \frac{M+m}{2 \cdot m} = \frac{7+10}{2 \times 10} = 0,85.$$

3. d) **Considérations théoriques.** Que les billes soient en acier dur ou en acier inox, on constate une remarquable et parfaite convergence entre les résultats trouvés ici (projectile : bille de 16 mm ; cible : bille de 18 mm) et ceux publiés antérieurement (projectile : bille de 18 mm ; cible : bille de 16 mm). Pour le physicien expérimentateur, cette constatation est importante et il convient d'attirer sur elle l'attention des élèves. En effet, cette convergence est une nécessité évidente pour le théoricien, qui interprète la permutation des rôles du projectile et de la cible comme un changement de référentiel. D'ailleurs, dans le référentiel du centre d'inertie, on a exactement le même phénomène pour deux chocs qui apparaissent très différents dans le référentiel du laboratoire, puisque projectile et cible permutent.

Nota. — Les fig. 8 et 8 *bis* montrent que, lors des chocs inélastiques de deux billes en acier inox, la relation $\vec{W}_2 = K \cdot \vec{V}_2$ est remarquablement vérifiée (voir § 4. b, p. 1069 ; \vec{W}_2 : vitesse de la cible après le choc ; \vec{V}_2 : vitesse qu'aurait eu la cible si le choc avait été élastique ; K : constante de valeur 0,88 à 0,01 près).

C'est une constatation différente qu'on fait pour les chocs de deux billes en acier dur, en conduisant de façon analogue l'exploitation des résultats expérimentaux (fig. 7 *bis*). Certes, les médiatrices des segments $B_i B_j$ sont pratiquement concourantes, ainsi que celle des segments $b'_i b'_j$; les points Ω et ω , ainsi déterminés, bien que distincts, sont très voisins de H. Par contre, leurs positions sont telles que :

$$A\omega > AH \quad \text{et} \quad \Omega B_0 > HB_0, \quad \text{avec} \quad \frac{A\omega}{AH} = \frac{\Omega B_0}{HB_0} \simeq 1,03 \text{ à } 0,01 \text{ près.}$$

Le cercle de centre Ω , sur lequel se trouvent les traces B_i , passe relativement loin de B_0 ; celui des points b'_i , de centre ω , ne passe pas par A. Incontestablement, les chocs des deux billes en acier dur 100 C 6 ne sont pas rigoureusement élastiques, mais la relation $\vec{W}_2 = K \cdot \vec{V}_2$ est sûrement fautive. Nous n'avons pas complètement élucidé les raisons de la divergence de comportement entre les chocs presque élastiques des billes en acier dur et les chocs nettement inélastiques des billes en acier inox.

Malgré ces difficultés, l'étude des chocs de deux billes en acier dur garde une très grande valeur pédagogique : les cercles tracés sur la fig. 7 sont satisfaisants, puisque les erreurs systématiques sont à peine supérieures aux incertitudes expérimentales ; on peut donc vérifier ainsi les lois du choc élastique avec une précision rarement atteinte en Mécanique expérimentale.

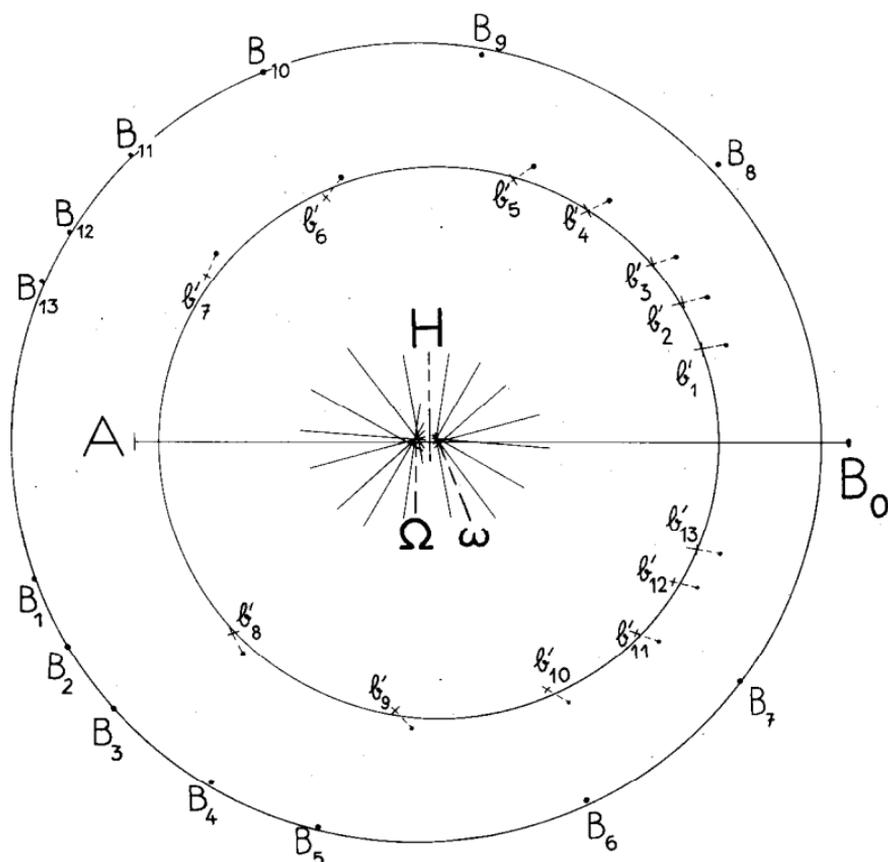


Fig. 7 bis. — Choc de deux billes en acier dur 100 C 6 : recul :
 projectile : diamètre 16 mm,
 cible : diamètre 18 mm.

4. AUTRES CHOCS D'UN PROJECTILE PLUS LEGER QUE LA CIBLE.

Comme nous l'avons signalé, une variante de l'appareillage, où l'avancée globale du promontoire atteint 16 centimètres, permet l'étude du choc d'une bille-projectile de 12 millimètres contre une bille-cible de 16 ou de 18 millimètres.

4. a) **L'appareillage et sa mise en œuvre.** Les modifications apportées au dispositif et au mode opératoire sont limitées ; nous allons signaler les principales.

La plaque mélaminée, carré de 40 centimètres de côté, épaisse de 12 à 16 millimètres, dépasse de 11 centimètres du bord de la

table. Le porte-à-faux du promontoire restant de 5 centimètres, l'avancée globale est bien : $11 + 5 = 16$ cm. On leste l'arrière de la plaque pour lui assurer une bonne stabilité (fig. 2).

L'épaisseur de la cale-porte-cible est choisie pour compenser la différence des rayons des billes servant de cible et de projectile. Cette cale est mise en place par le même procédé que précédemment ; seul change le rayon du demi-cercle tracé sur la plaquette en altuglas transparent : 14 mm ou 15 mm au lieu de 17 mm ; et a_1 devient égal à 7,5 mm ou 8,9 mm (§ 3. b). Aucun changement n'est à mentionner dans le processus utilisé pour mettre en bonne position la cale-promontoire et la gouttière.

Comme nous l'avons fait remarquer au début de cet article (§ 1. b), il faut choisir une portée initiale AB_0 bien adaptée, tenant notamment compte des possibilités de recul ; pour les expériences, dont les résultats sont commentés ci-après : $AB_0 = 41$ cm. Le point de la gouttière, d'où la bille-projectile doit être lâchée, est trouvé par tâtonnements (voir § 3. c, p. 1061, 3^e alinéa).

4. b) Les résultats. Les photographies d'enregistrements concernent les chocs de deux billes d'acier : projectile 12 mm ; cible 16 mm ; ces deux billes sont soit en acier dur 100 C 6 (fig. 9), soit en acier inox 18/8 (fig. 10). L'étude est conduite de la même façon que précédemment ; les notations sont les mêmes.

On arrive à des conclusions analogues. La vérification des lois du choc est bonne. Les droites $B_i b'_i$ ou $D_i d'_i$ se coupent pratiquement en un point H, qui partage le segment AB_0 dans le rapport : $HB_0/HA = 2,4$, sensiblement égal à la valeur théorique : $m/M = 7/3$.

Avec les billes en acier dur (fig. 9), les chocs sont pratiquement élastiques. Dans les expériences numérotées 1, 2, 3, 4, 15, 16 et 17, il y a recul du projectile ; ce recul est parfois important.

Avec les billes en acier inox (fig. 10), les chocs sont inélastiques. Les points D_i d'une part, les points d'_i d'autre part sont sur deux cercles, excentrés par rapport à H. On trouve pour le coefficient K à peu près la même valeur que dans les autres expériences faites avec des billes en inox : $K \simeq 0,88$; il est donc nettement supérieur à la valeur limite autorisant le

recul en ce cas :
$$K = \frac{M + m}{2m} = \frac{3 + 7}{2 \times 7} = 0,7.$$
 Effectivement,

il y a recul dans cinq chocs, numérotés 1, 2, 13, 14 et 15 ; bien entendu, ce recul est toujours moins important que celui qu'aurait provoqué un choc élastique.

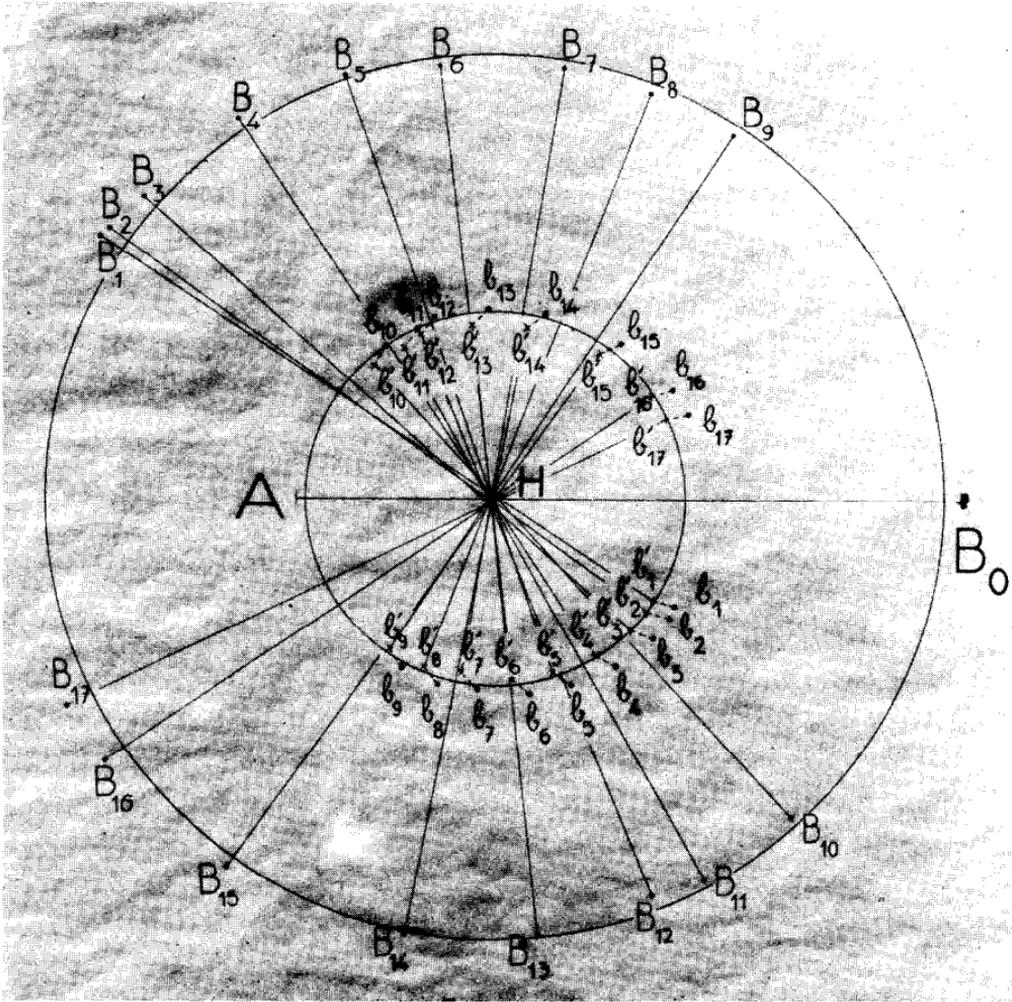


Fig. 9. — Choc de deux billes en acier dur 100 C 6 : recul :
 projectile : diamètre 12 mm,
 cible : diamètre 16 mm.

5. UNE REMARQUE.

Bien des variantes sont possibles et intéressantes ; nous avons décrit les dispositifs que nous avons effectivement utilisés, qui nous ont donné de bons résultats, que nous croyons particulièrement bien adaptés aux cas étudiés. Mais des considérations autres que celles qui nous ont guidé peuvent être prises en compte.

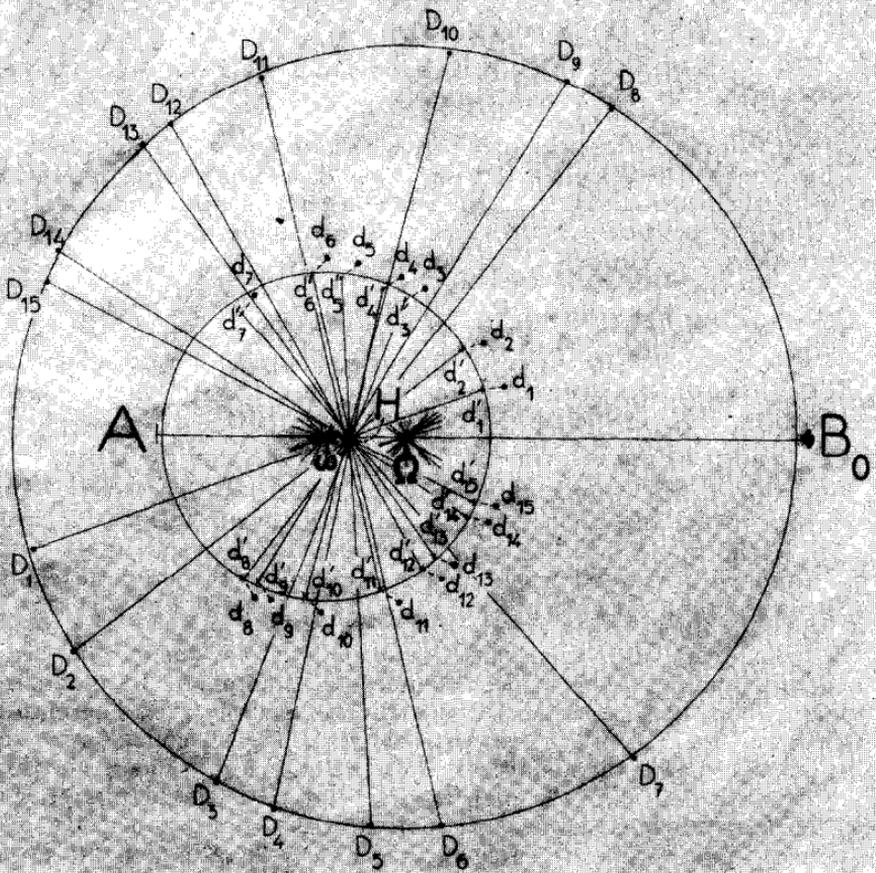


Fig. 10. — Choc de deux billes en acier inox 18/8 : recul :
 projectile : diamètre 12 mm,
 cible : diamètre 16 mm.

... où l'on voit que les centres Ω et ω sont déterminés graphiquement par l'intersection des médiatrices de segments $D_i D_j$ et $d'_i d'_j$...

Par exemple, on peut estimer avantageux d'opérer toujours avec le même dispositif où la plaque mélaminée, le promontoire et la gouttière sont réglés et fixés une fois pour toutes ; il suffit de jouer sur la portée initiale AB_0 , qui doit être convenablement

choisie pour chaque couple projectile-cible expérimenté. Ainsi, avec une avancée globale de 16 centimètres, on prendra :

$$AB_0 = 30 \text{ cm pour le couple (12 mm - 18 mm),}$$

$$AB_0 = 40 \text{ cm pour les deux couples (12 mm - 16 mm) et (16 mm - 18 mm).}$$

Citons un autre exemple. Pour l'étude des chocs du couple : projectile 16 mm - cible 18 mm, il est inutile que la plaque mélaminée dépasse la table, si on règle la portée initiale à la valeur $AB_0 = 30$ centimètres ; l'avancée du promontoire, 5 centimètres, est alors suffisante (7).

6. CHOC DE DEUX BILLES DE MASSES EGALES.

6. a) **Appareillage et mise en œuvre.** Pour l'étude des chocs de deux billes d'acier de 16 millimètres, le dispositif a été légèrement modifié en tenant compte des deux faits suivants :

- il ne peut pas y avoir recul du projectile ;
- pour qu'au moment du choc, les centres des billes soient dans un même plan horizontal, il faut que, avant le choc, le projectile roule sur une plaquette ayant l'épaisseur de la cale-porte-cible ; nous avons choisi 4 millimètres pour cette épaisseur commune.

La disposition générale (fig. 11) est très voisine de celle adoptée pour les expériences relatées précédemment. La plaquette de roulement se termine par un trapèze, la largeur de l'extrémité n'étant que 20 millimètres (fig. 11 a) ; elle est collée, avec de l'adhésif double-face, sur la plaque mélaminée, de façon que son extrémité soit dans le plan vertical du bord de la plaque. La gouttière en bois, dont la section de base repose sur cette plaquette, est, après un réglage convenable par tâtonnements (voir précédemment § 2. c), maintenue en bonne position par deux butées (fig. 11 c).

En ce cas aussi, il convient d'éviter les chocs presque frontaux et les simples frôlements. La précision est meilleure lorsque les vitesses après choc élastique ont la même norme, c'est-à-dire si :

$$a_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} \times \frac{1}{2} \sqrt{3 - \frac{m}{M}} = 16 \times \frac{\sqrt{3-1}}{2} = 11,3 \text{ mm.}$$

(7) D'après le § 1. b, la portée du recul est :

$$-\frac{10-7}{10+7} \times 30 = -5,3 \text{ cm,}$$

mais un choc frontal, donnant le recul maximal, est irréalisable.

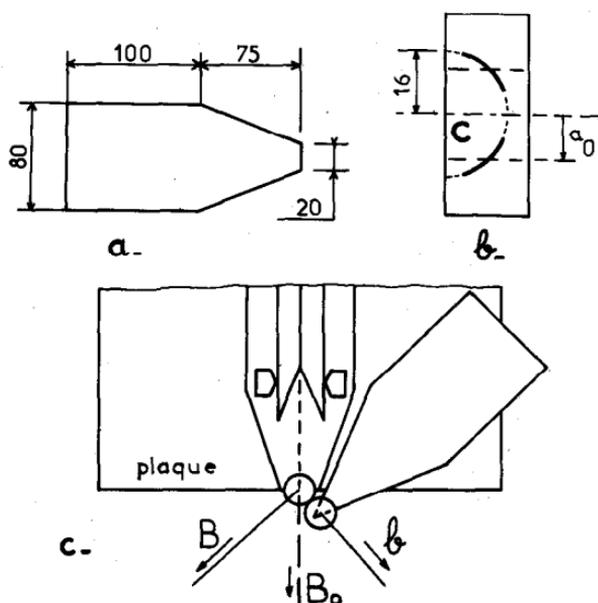


Fig. 11. — Choc de billes de masses égales :
 a) plaquette de roulement du projectile (altuglas blanc),
 b) plaquette de réglage de la cible,
 c) disposition générale.

Ces considérations justifient les dessins faits sur la plaquette d'altuglas transparent, destinée à faciliter la mise en bonne position de la cale-porte-cible (fig. 11 *b*) ; lorsque cette plaquette est appliquée contre le champ de la plaque mélaminée, la cuvette de la cale doit être au-dessus de l'un des deux arcs du demi-cercle de rayon 16 millimètres.

Nota. — Ce dispositif, avec plaquette de roulement en altuglas, est utilisable dans le cas de chocs d'un projectile de masse supérieure à celle de la cible ; il suffit de prendre une cale-porte-cible d'épaisseur convenable. Il s'agit là d'un perfectionnement de l'appareillage décrit dans le premier article : la cale-porte-cible et sa cuvette sont beaucoup plus faciles à réaliser dans l'altuglas que dans l'acier inox (précédents §§ 2 *b* et *d*, renvois 3 et 5).

6. b) Chocs élastiques ou presque élastiques. Du point de vue théorique, si le choc est élastique, l'égalité des masses du projectile et de la cible entraîne deux conséquences (§§ 1. *a* et *b*, fig. 1, p. 1053 à 1055) :

- dans le référentiel du centre d'inertie, le projectile et la cible ont, après le choc, des vitesses de même norme : $V_0/2$;
- dans le référentiel du laboratoire, les vitesses après le choc, \vec{V}_1 et \vec{V}_2 , sont orthogonales.

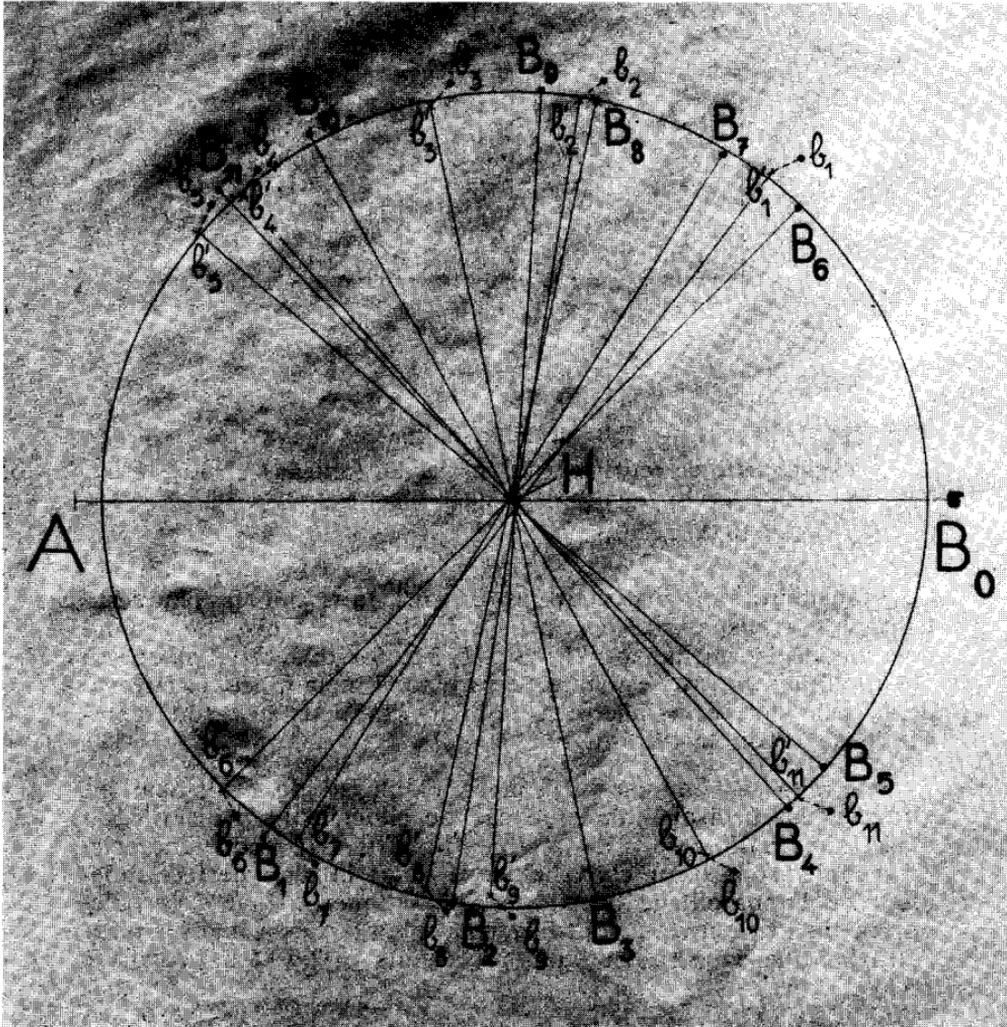


Fig. 12. — Choc de deux billes identiques en acier dur 100 C 6 :
projectile et cible : diamètre 16 mm.

La photographie des expériences faites avec deux billes d'acier dur 100 C 6 (fig. 12) prouve que la vérification est bonne :

- les droites $B_i b'_i$ se coupent pratiquement en H, milieu du segment AB_0 ;
- tous les points B_i et b'_i sont très proches du même cercle de centre H et passant tout près des points A et B_0 ;

— si B_i , b'_i et A étaient rigoureusement sur le même cercle, les deux premiers points étant diamétralement opposés, l'angle $B_i A b'_i = (\vec{V}_1, \vec{V}_2)$ serait droit ; en fait, les mesures donnent des valeurs comprises entre 85° et 88° , ce qui prouve que ces chocs entre billes en acier dur 100 C 6 ne sont jamais rigoureusement élastiques.

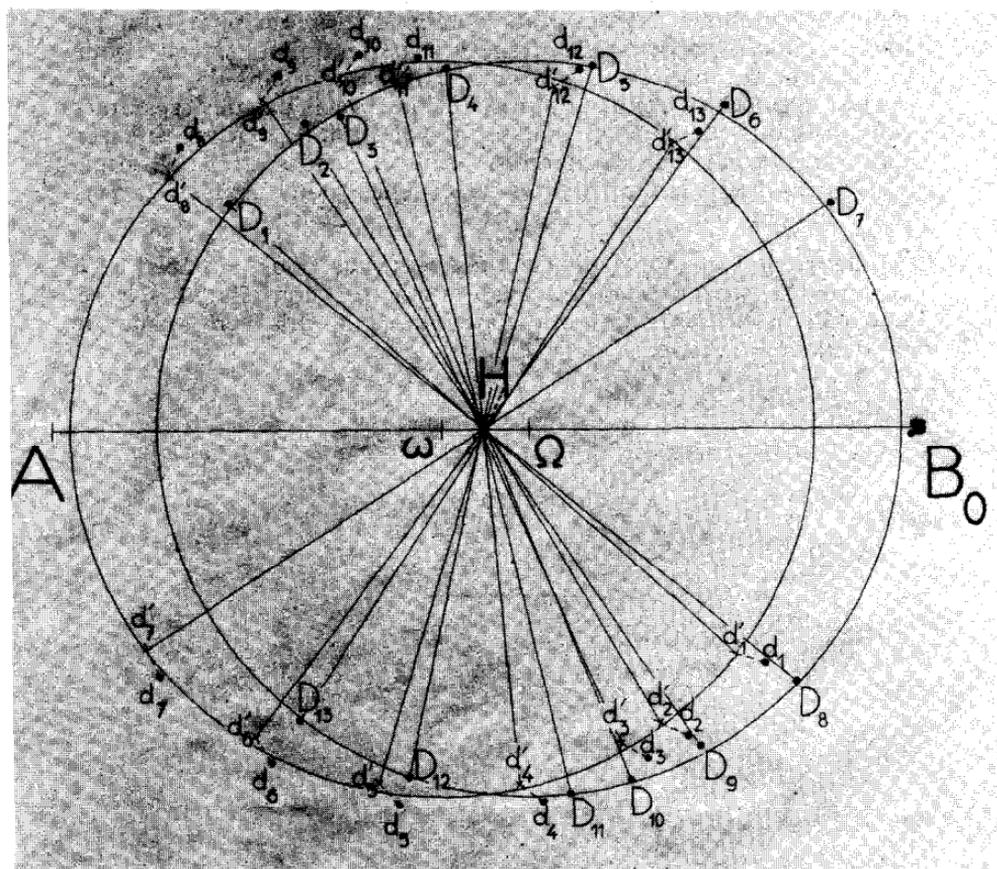


Fig. 13. — Choc de deux billes identiques en acier inox 18/8 : projectile et cible : diamètre 16 mm.

6. c) **Chocs inélastiques.** Si les deux billes sont en acier inox, les chocs sont inélastiques (fig. 13). Les droites $D_i d'_i$ se coupent en H, milieu du segment AB_0 ; mais les points D_i sont voisins d'un cercle et les points d'_i , d'un autre; ces deux cercles, de même rayon, ont respectivement pour centre Ω et ω , placés symétriquement de part et d'autre de H. La mesure de leur rayon (§ 3. c) et l'interprétation précédemment proposée (voir § 4. b, fig. 8, p. 1069 et 1070) conduisent pour le coefficient K à une valeur en ce cas encore voisine de celle trouvée dans les autres expériences : $K \simeq 0,89$ à 0,01 près.

7. CONCLUSION.

Tel qu'il est et qu'il vient d'être décrit, l'appareillage, que nous avons mis au point, permet à des élèves de lycée de manipuler et d'obtenir des résultats démonstratifs, vérifiant bien les lois du choc. Cela nous encourage à le perfectionner encore, pour en faciliter l'emploi et en permettre l'utilisation dans des cas plus variés. D'autre part, la fiabilité et la précision des résultats obtenus nous incite à en pousser l'exploitation et à en préciser l'interprétation; des recherches sont en cours et nous espérons surmonter les difficultés auxquelles nous nous heurtons actuellement.

Je remercie Monsieur Georges GUINIER pour l'intérêt qu'il continue à porter à mon travail, pour ses conseils et ses remarques judicieuses qui ont contribué à la mise en forme de ce deuxième article.
