

Expériences sur le choc de billes

Le but de cet article est de décrire des expériences permettant à des élèves de lycée de vérifier les lois du choc. L'appareillage est assez simple, robuste et peu coûteux, pour que le cabinet de physique de tout lycée puisse en avoir une douzaine d'exemplaires. Le lecteur trouvera dans cet article, outre la description détaillée du dispositif et des modalités expérimentales, toutes les justifications théoriques nécessaires à l'interprétation des résultats.

Avec ce matériel, diverses manipulations peuvent être proposées dans les trois classes du Second Degré. En classe de Seconde, on pourra illustrer les notions de quantité de mouvement et de centre d'inertie ; mais il conviendra d'y interpréter les expériences de la façon la plus simple possible. Des services pourront être rendus en classe de Première, où les sujets de manipulation touchant la mécanique ne sont pas nombreux ; on y trouvera l'occasion de revoir de façon intéressante des questions antérieurement traitées et d'aborder le point de vue énergétique. En classe Terminale enfin, on pourra donner une interprétation complète des résultats expérimentaux, se placer dans le référentiel du centre d'inertie et vérifier le mouvement de chute du centre d'inertie d'un système formé de parties indépendantes. C'est au professeur qu'il reviendra de concevoir une manipulation adaptée à son enseignement et au niveau de ses élèves ; l'auteur se borne ici à lui fournir tous les éléments, pratiques et théoriques, qui lui faciliteront la tâche, mais s'abstient de donner un exemple de manipulation-type.

1. RAPPEL DE RESULTATS CONCERNANT LE CHOC DE DEUX POINTS MATERIELS ET POSITION DU PROBLEME EXPERIMENTAL.

Pour que l'exposé soit plus clair, il convient de commencer par le rappel de quelques résultats théoriques. Conformément à une habitude assez fréquente, nous désignerons la norme d'un vecteur par la même lettre que ce vecteur, mais non surmontée d'une flèche : $\|\vec{V}\| = V$.

1. a. Etudions d'abord le choc de deux points matériels dans le référentiel du centre d'inertie. Les points, de masse m et m' , ont respectivement les vitesses \vec{v}_0 et \vec{v}'_0 avant le choc,

\vec{v}_1 et \vec{v}'_1 après celui-ci. Par définition, la quantité de mouvement du système est toujours nulle :

$$m \vec{v}_0 + m' \vec{v}'_0 = \vec{0}, \quad m \vec{v}_1 + m' \vec{v}'_1 = \vec{0};$$

d'où :

$$\vec{v}'_0 = -\frac{m}{m'} \vec{v}_0, \quad \vec{v}'_1 = -\frac{m}{m'} \vec{v}_1.$$

Initialement, l'énergie cinétique est :

$$E_0 = \frac{1}{2} m v_0^2 + \frac{1}{2} m' v_0'^2 = \frac{m(m+m')}{2m'} v_0^2.$$

Dans le choc, il n'y a pas obligatoirement conservation de l'énergie cinétique ; après le choc, elle est $\alpha^2 E_0$, avec $0 \leq \alpha \leq 1$. On a donc :

$$\alpha^2 E_0 = \frac{1}{2} m v_1^2 + \frac{1}{2} m' v_1'^2 = \frac{m(m+m')}{2m'} v_1^2.$$

La comparaison des deux expressions implique :

$$v_1 = \alpha v_0, \quad \text{donc :} \quad v'_1 = \alpha v'_0.$$

Cette étude conduit aux conclusions suivantes :

- Si $\alpha = 1$, le choc est élastique ; il y a conservation de l'énergie cinétique. Par suite du choc, les vitesses des deux points matériels changent de direction, mais gardent leurs normes.
- Si $0 < \alpha < 1$, le choc est inélastique ou mou. Pour les vitesses, le changement de direction s'accompagne d'une diminution des normes ; celles-ci sont multipliées par le même facteur $\alpha < 1$. L'énergie cinétique initiale E_0 est partagée en deux : la première partie $\alpha^2 E_0$ reste sous forme cinétique ; la seconde $(1 - \alpha^2) E_0$ est transformée en une autre forme.
- Si $\alpha = 0$, le choc est parfaitement mou ; les vitesses s'annulent. L'énergie cinétique initiale est totalement transformée en une autre forme d'énergie.

Retenons ces conclusions et changeons de notations pour traiter le problème qui nous intéressera désormais.

1. b. Dans le référentiel du laboratoire, un point matériel,

le *projectile*, a la masse M et la vitesse \vec{V}_0 ; il heurte un autre point matériel, la *cible*, de masse m , initialement immobile. Après

le choc, les vitesses sont \vec{V}_1 pour le projectile, \vec{V}_2 pour la cible. Avant comme après le choc, le centre d'inertie G a la vitesse :

$$\vec{V}_G = \frac{M}{M+m} \vec{V}_0.$$

Dans le référentiel de ce centre d'inertie, les vitesses avant le choc sont :

— pour le projectile,

$$\vec{V}_0 - \vec{V}_G = \frac{m}{M + m} \vec{V}_0 ;$$

— pour la cible,

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

Après le choc, les vitesses, dans ce référentiel du centre d'inertie, sont :

— pour le projectile, \vec{v}_1 de direction quelconque, *a priori* inconnue, et de norme $v_1 = \alpha \frac{m}{M + m} V_0$;

— pour la cible, $\vec{v}_2 = -\frac{M}{m} \vec{v}_1$, de norme $v_2 = \alpha \frac{M}{M + m} V_0$.

Repassons dans le référentiel du laboratoire ; on a évidemment : $\vec{V}_1 = \vec{V}_G + \vec{v}_1$; $\vec{V}_2 = \vec{V}_G + \vec{v}_2 = \vec{V}_G - \frac{M}{m} \vec{v}_1$.

Cela est traduit par le schéma (fig. 1), où les bipoints \overline{AB} , \overline{Ab} , \overline{AH} représentent respectivement les vecteurs \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_G .

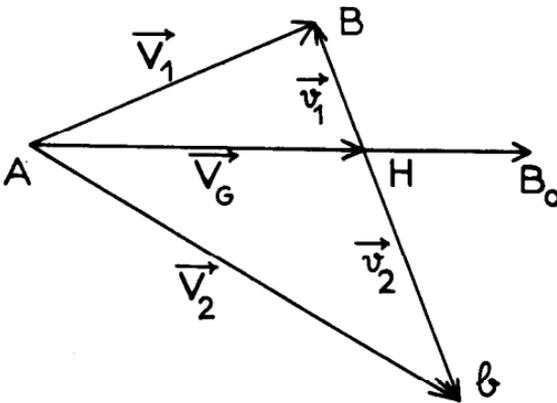


Fig. 1

Précisons bien que la vitesse \vec{V}_G , et par suite le point H, sont complètement déterminés par les masses M et m et par la vitesse \vec{V}_0 . Si on imagine une série de chocs avec le même projectile et la même cible, la vitesse initiale du projectile étant toujours la même, on obtient différents couples de bipoints AB_i et Ab_i ; toutes les droites $B_i b_i$ se coupent au point H, que les chocs soient élastiques ou non. De plus, dans le cas où tous les chocs sont élastiques, les normes de \vec{v}_1 et de \vec{v}_2 , et par conséquent les longueurs HB et Hb, sont déterminées, puisqu'elles ne dépendent que de M , m et V_0 ; tous les points B_i sont sur un cercle de centre H passant par B_0 , point tel que le bipoint \vec{AB}_0 représente le vecteur vitesse \vec{V}_0 ; quant aux points b_i , ils sont sur le cercle de centre H et de rayon HA.

Telles sont les propriétés qu'il faut tenter de vérifier expérimentalement. Evidemment, il n'existe pas de points matériels, mais le mouvement du centre d'une bille homogène est celui d'un point matériel. C'est pourquoi nous ferons des expériences sur le choc de deux billes, en ne nous intéressant qu'aux mouvements de translation de leurs centres. Précisons bien que le choc ne devra être considéré comme élastique que s'il y a conservation de l'énergie cinétique de translation; il sera inélastique dans tous les autres cas, notamment si une partie de l'énergie cinétique de translation se transforme en énergie cinétique de rotation.

1. c. Traitons dès maintenant un problème très particulier dont la solution sera ultérieurement utile. Calculons l'angle $\varphi = (\vec{V}_0, \vec{V}_2)$ lorsque, après un choc élastique, les normes des deux vitesses sont égales: $V_2 = V_1$.

Les relations :

$$v_2 = V_G = \frac{M}{M+m} V_0 \quad \text{et} \quad \vec{V}_2 = \vec{V}_G + \vec{v}_2$$

impliquent que le triangle HAb (fig. 1) est isocèle et que l'angle $(\vec{V}_0, \vec{V}_2) = 2\varphi$.

La conservation de l'énergie cinétique :

$$\frac{1}{2} M V_0^2 = \frac{1}{2} M V_1^2 + \frac{1}{2} m V_2^2,$$

entraîne :

$$V_1 = V_2 = \sqrt{\frac{M}{M+m}} V_0.$$

Evaluons de deux façons différentes le produit scalaire :

$$\vec{V}_0 \cdot \vec{V}_2 = \sqrt{\frac{M}{M+m}} V_0^2 \cos \varphi = (\vec{V}_0 \cdot \vec{V}_G) + (\vec{V}_0 \cdot \vec{v}_2) \dots$$

$$\dots = \frac{M}{M+m} V_0^2 (1 + \cos 2\varphi)$$

d'où :
$$\cos \varphi = 2 \sqrt{\frac{M}{M+m}} \cos^2 \varphi.$$

Comme $\cos \varphi = 0$ est inacceptable, car cela conduit au choc parfaitement mou, on en déduit :

$$\cos \varphi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{M+m}{M}}, \quad \sin \varphi = \frac{1}{2} \sqrt{3 - \frac{m}{M}}.$$

A la seule condition que $m < 3M$, il existe un angle φ et on peut avoir $V_1 = V_2$.

2. DETERMINATION D'UNE VITESSE HORIZONTALE.

Il y a un procédé assez simple pour déterminer la direction et la norme de la vitesse de translation du centre d'une bille, lorsque le mouvement est horizontal. Soit une bille roulant sur une surface plane horizontale, celle d'une table par exemple. Elle

arrive au bord de la table avec la vitesse \vec{V} ; elle tombe et vient frapper le sol en B ; soit A la projection sur le sol du point où la bille quitte l'appui horizontal. Comme on peut négliger la résistance de l'air, on a, en désignant par h la hauteur de chute :

$$AB = Vt = V \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad \text{ou mieux} \quad \vec{AB} = \vec{V} \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Le vecteur \vec{AB} , que nous appellerons la « portée », permet de connaître le vecteur vitesse \vec{V} ; bien mieux, la portée représente la vitesse, avec une échelle convenable.

Si les élèves ont étudié la chute des corps, la présentation n'offre aucune difficulté ; mais elle est encore tout à fait possible pour des élèves de Seconde, auxquels il faut demander d'admettre, après une justification expérimentale partiellement qualitative, la relation $\vec{AB} = k\vec{V}$, c'est-à-dire que la portée, indépendante de la masse, est proportionnelle à la vitesse. Comme les expériences justificatives se font avec l'appareillage servant à l'étude des chocs, nous les décrirons ultérieurement (§ 3. c).

Ce procédé de détermination ne s'applique que si l'orientation de ce vecteur vitesse oblige la bille à quitter l'appui du plan

horizontal. On s'arrange pour qu'il en soit ainsi pour la vitesse initiale \vec{V}_0 , qui est normale au bord de la table. Il en est alors toujours ainsi pour la vitesse \vec{V}_2 de la cible ; c'est aussi toujours le cas pour la vitesse \vec{V}_1 si la masse du projectile est supérieure à celle de la cible. Vérifions-le en calculant les produits scalaires de V_0 avec \vec{V}_2 et avec \vec{V}_1 ; on pose : $\theta = (\vec{V}_0, \vec{v}_1)$.

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 \cdot \vec{V}_2 &= \vec{V}_0 \cdot \left(\vec{V}_G - \frac{M}{m} \vec{v}_1 \right) \dots \\ &= \frac{M}{M+m} V_0^2 - \alpha \frac{M}{M+m} V_0^2 \cos \theta \\ &= \frac{M}{M+m} V_0^2 (1 - \alpha \cos \theta) > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_0 \cdot \vec{V}_1 &= \vec{V}_0 \cdot (\vec{V}_G + \vec{v}_1) = \frac{M}{M+m} V_0^2 + \alpha \frac{m}{M+m} V_0^2 \cos \theta \\ &= \frac{V_0^2}{M+m} (M + \alpha m \cos \theta). \end{aligned}$$

Si $M > m$, on a toujours $M + \alpha m \cos \theta > 0$ et $\vec{V}_0 \cdot \vec{V}_1 > 0$.

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MODE OPERATOIRE.

3. a. *Les billes.* Parmi les billes d'acier qu'on trouve assez facilement au détail dans le commerce (Etablissements spécialisés en roulements à billes ou billes industrielles), il est commode de choisir celles ayant les diamètres 18 mm, 16 mm et 12 mm, car les rapports de leurs masses sont voisins de valeurs simples :

$$\left(\frac{16}{18} \right)^3 = 0,7023 \approx \frac{7}{10} ; \quad \left(\frac{12}{18} \right)^3 = 0,2963 \approx \frac{3}{10}.$$

En utilisant une unité arbitraire et convenable (1), on peut donner aux masses de ces billes les valeurs respectives : 10, 7, 3.

En fait, les expériences que nous décrirons ont été faites avec une bille-projectile de 18 mm, $M = 10$, et une bille-cible de 16 mm, $m = 7$.

Pour que les chocs soient tous presque élastiques, il faut des billes en acier dur au chrome, c'est-à-dire des billes en acier 100 C 6, qui servent à faire des roulements. Des expériences

(1) Cette unité vaut environ 2,38 grammes.

sont faites avec des billes en acier inox 18/8 ; en ce cas, certains chocs ne sont pas élastiques.

Si on peut négliger les actions de frottement, l'impulsion due au choc des deux billes est portée par la droite joignant leurs centres au moment du contact ; en particulier, cela est nécessaire pour que le choc soit élastique. Il faut que ces centres soient dans le même plan horizontal, ce qui implique l'emploi d'une cale dont l'épaisseur est égale à la différence des rayons, soit 1 millimètre.

3. b. *L'appareillage.* Les principaux éléments du dispositif expérimental sont les suivants (fig. 2) :

— Une plaque mélaminée d'environ 40×25 centimètres et d'une épaisseur courante de 8,4 millimètres, munie de quatre pieds collés de 3,3 millimètres de hauteur (pieds provenant d'une

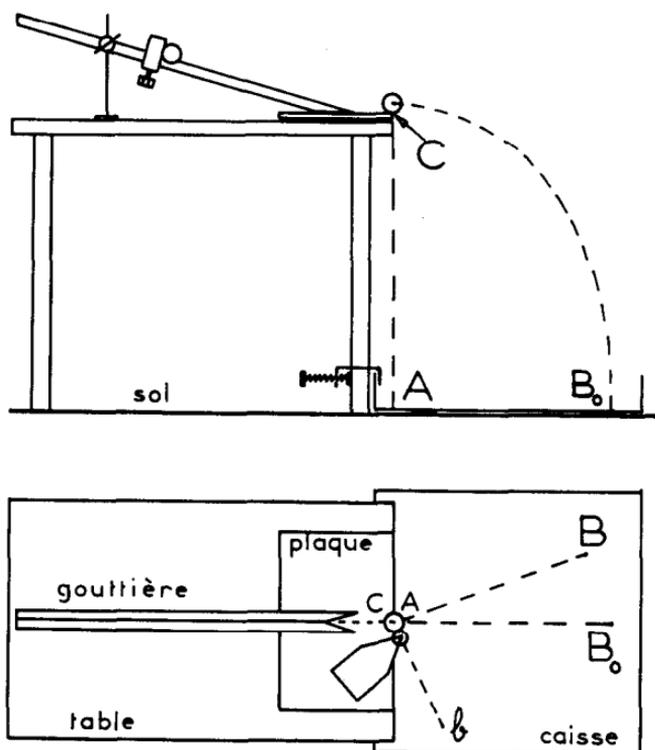


Fig. 2

plaque de caoutchouc ou des rondelles de robinetterie) (2), est placée sur une table de manipulation ; elle est horizontale et l'un de ses bords est dans le plan vertical du bord de la table.

- Une baguette de recouvrement d'angle, en bois, longue d'environ 1 mètre, forme gouttière et sert de chemin de roulement incliné pour lancer la bille-projectile. Une de ses extrémités est sciée en biais de façon à s'appliquer contre la plaque stratifiée, lorsque la gouttière a l'inclinaison voulue, environ 14° ; une feuille de caoutchouc, collée sur cette section, s'oppose au glissement. Cette gouttière est placée perpendiculairement au bord de la plaque de sorte que son extrémité en soit à environ 10 centimètres ; elle est maintenue par un support (trépied avec pince) et des butées latérales.
- Une cale en acier inox de 1 millimètre d'épaisseur (fig. 3) ; à sa pointe, la cuvette, destinée à immobiliser la bille-cible, est l'empreinte, de diamètre environ 1,5 millimètres, obtenue en donnant un coup de marteau sur une bille d'acier dur de 21 millimètres. On peut aussi placer la bille dans l'orifice d'un trou de 1 millimètre réalisé avec une mini-perceuse.

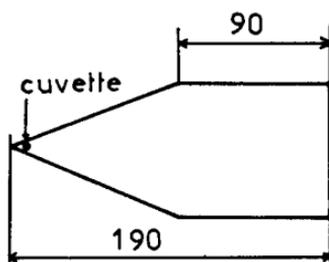


Fig. 3. — Cale en inox de 1 mm d'épaisseur pour bille-cible de 16 mm.

- Une caisse de réception des billes, à fond carré, de 65 à 70 centimètres de côté, en contreplaqué ou en panolac, a des rebords de 10 centimètres. Utiliser, à défaut, un grand tiroir. Cette caisse, munie de pieds antidérapants, est posée sur le sol, symétriquement par rapport au plan vertical de la gouttière. Un des côtés, parallèle au bord de la table, est en léger retrait et est fixé aux pieds de celle-ci par deux petits serre-joints. Le fond est recouvert d'une feuille de papier blanc fort, sur laquelle on place, au moment voulu pour enregistrer les impacts des billes, une feuille de papier-carbone (on trouve dans le commerce des feuilles de carbone « à main », grasses, de dimensions 60×65 centimètres, dans les couleurs bleu et rouge).

3.c. *Expériences préliminaires et de réglage.* Il y en a plusieurs dont les buts sont différents ; nous terminerons par la justification expérimentale, nécessaire pour les élèves de Seconde, de la proportionnalité de la portée à la vitesse.

(2) Comme nous le verrons, cette épaisseur et cette hauteur permettent l'obtention d'un choc parfaitement mou grâce au dispositif qui sera ultérieurement décrit (§ 3.e).

Tout d'abord, après avoir disposé une feuille de papier-carbone gras de petites dimensions sur la plaque stratifiée, entre l'extrémité de la baguette et le bord, on lâche la bille-projectile d'un point quelconque de la gouttière. Comme, dans la partie horizontale de sa trajectoire, la bille fait de légers rebonds qui d'ailleurs s'atténuent rapidement, la trace rectiligne enregistrée est formée de traits discontinus. On enlève alors la petite feuille de papier-carbone. On repère ainsi le point C où la bille quitte l'appui de la plaque. Grâce à un fil à plomb s'enroulant sur une épingle plantée dans le champ du bois, on détermine le point A, projection verticale de C sur le fond de la caisse (fig. 2).

On cherche ensuite par tâtonnements un point de la gouttière d'où doit être lâchée la bille-projectile pour que la portée soit voisine de 50 centimètres. Cette exigence est facile à justifier ; avec les notations déjà utilisées (§ 1. b et fig. 1), on prévoit, si $AB_0 (V_0) = 50$ cm, que :

$$AH(V_G) = \frac{M}{M+m} AB_0 = \frac{10}{17} 50 = 29,4 \text{ cm,}$$

$$HB(v_1) = \alpha \frac{m}{M+m} AB_0 = \alpha \frac{7}{17} 50 = \alpha 20,6 \text{ cm,}$$

$$Hb(v_2) = \alpha \frac{M}{M+m} AB_0 = \alpha \frac{10}{17} 50 = \alpha 29,4 \text{ cm.}$$

Les points d'impact des billes après un choc seront donc convenablement disposés.

Pour faire ce réglage, on place dans la caisse, à la distance voulue de A, un petit objet servant de repère. Après quelques essais, on visse à l'endroit convenable de la gouttière une noix de serrage à faces planes. Il est alors nécessaire de vérifier la fiabilité du dispositif. Pour cela, on recouvre le papier blanc du fond de la caisse d'une grande feuille de papier-carbone. La bille, appliquée contre la noix, est maintenue avec le doigt ; on la libère en la soulevant rapidement. On recommence plusieurs fois et on constate que les différentes taches d'impact se superposent. Le procédé permet donc de communiquer à la bille-projectile une vitesse \vec{V}_0 bien définie et la portée \overline{AB}_0 est bien déterminée.

Pour les élèves de Seconde, il est important de montrer que la portée ne dépend pas de la masse de la bille ; pour ceux qui ont étudié la chute des corps, cela peut constituer une vérification expérimentale intéressante. Il est facile d'opérer avec deux billes, l'une de diamètre 18 millimètres, l'autre de 16 millimètres ; il est même possible de changer de couleur de papier-carbone en même temps que de bille. Une dizaine d'essais montrent que les taches obtenues se superposent presque totalement. L'incertitude sur la valeur de \overline{AB}_0 est inférieure à 1 %.

Lorsqu'il est nécessaire de montrer la proportionnalité de la portée à la vitesse, c'est-à-dire de justifier la relation $\overrightarrow{AB} = k \overrightarrow{V}$, deux moyens peuvent être utilisés, éventuellement l'un après l'autre. Le premier repose sur des expériences qualitatives faites par les élèves eux-mêmes : plus le point de départ sur la gouttière est élevé, plus la bille roule vite dans le trajet horizontal, plus la portée est grande. Dans le second, le professeur fait des mesures grâce à une horloge électronique au centième de seconde et à deux couples diode-cellule photoélectrique (l'ensemble a été fourni par le C.E.M.S. sous le numéro MS 25B1 et la référence 1305) ; ceux-ci sont disposés à 10 centimètres l'un de l'autre entre l'extrémité de la gouttière et le bord de la plaque ; lorsque la bille coupe le premier faisceau, l'horloge se met en route ; elle s'arrête lors de l'interruption du deuxième faisceau. On obtient ainsi des données qui permettent de vérifier avec précision que la portée est proportionnelle à la vitesse.

3. d. *Choc de deux billes d'acier.* Les expériences préalables étant faites, on peut commencer celles du choc de deux billes. Pour cela, on opère comme suit. Grâce à une feuille de carton ayant une perforation convenable, on place en C la bille-projectile, celle de 18 mm. La bille-cible, de 16 mm, est mise dans la cuvette de la cale ; on approche cet ensemble jusqu'à ce que la cible soit en contact avec le projectile ; sans toucher la cale ni la cible, on enlève le projectile et le carton perforé (fig. 4). La bille-projectile est placée contre la noix, puis lâchée ; le choc se produit ; les deux billes tombent et, en venant frapper le papier-carbone, donnent deux traces d'impact sur le papier blanc

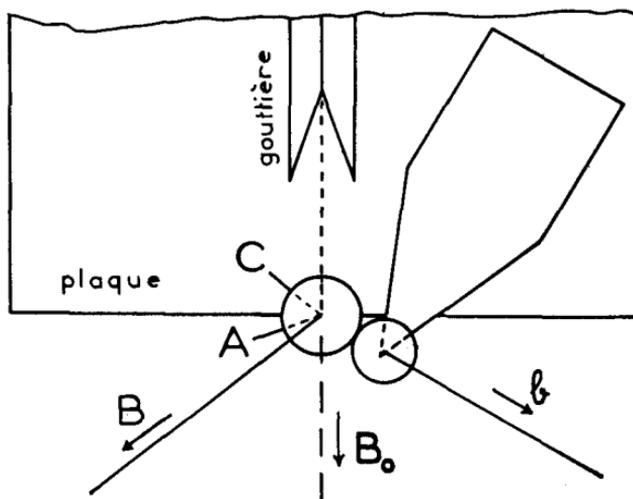


Fig. 4

garnissant le fond de la caisse. Il est bon de numéroter immédiatement ces traces : B_1 et b_1 après le premier choc ; B_2 et b_2 après le deuxième, etc. ; il n'y a aucun risque de confondre B , trace du projectile, avec b , trace de la cible, car elles sont de part et d'autre du plan CAB_0 et la cible ne traverse pas ce plan lors de sa chute.

Mentionnons un point de détail. Les expériences sont plus nettes et les vérifications expérimentales meilleures et plus précises lorsque, pour les deux billes, les vitesses après le choc ont des normes de valeurs voisines. Nous avons déterminé la condition de l'égalité $V_1 = V_2$ dans le cas d'un choc élastique de deux points matériels (§ 1. c). Lors du choc de deux sphères, l'impulsion est portée par la droite passant par leurs centres à l'instant du contact, la cible est donc projetée dans cette direction ; c'est

celle du vecteur \vec{V}_2 . Il est facile de calculer la distance a du centre de la cible à la trajectoire horizontale rectiligne du projectile avant le choc ; on a, en désignant par d_1 et d_2 les diamètres des billes :

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} \sin \varphi = \frac{d_1 + d_2}{4} \sqrt{3 - \frac{m}{M}}.$$

Dans le cas expérimental considéré :

$$a = \frac{18 + 16}{4} \sqrt{3 - \frac{7}{10}} \approx 13 \text{ mm.}$$

Pour le premier choc, on s'arrangera pour que le centre de la cible immobile soit à environ 13 millimètres du plan CAB_0 ; pour les suivants, on écartera ou on rapprochera un peu la cible. (Pour situer la cuvette, après choix de l'impact de la cible, on peut faire des visées en appliquant contre le bord de la plaque le côté d'un rectangle transparent en altuglas. Il porte un demi-cercle de rayon 17 millimètres centré sur ce côté ; deux demi-droites lui étant perpendiculaires indiquent $a \approx 13$ mm). Toutefois, il est difficile de réussir un choc, soit presque frontal, soit où le projectile frôle seulement la cible. Bien entendu, on placera la cible soit à droite, soit à gauche de C ; il est démonstratif de réaliser à peu près le même nombre de chocs dans l'un et dans l'autre de ces deux cas.

3. e. Réalisation d'un choc parfaitement mou. Pour que le choc soit parfaitement mou, il faut que le projectile soit piégé par la cible ; de plus, pour que la comparaison soit intéressante, il est nécessaire que la masse de cette cible soit la même que celle de la bille d'acier de 16 millimètres de diamètre (environ 16,7 g). On obtient une cible répondant à ces conditions en prenant une balle de ping-pong, 38 millimètres de diamètre, sans soudure apparente à l'extérieur ; on y pratique une ouverture circulaire de 25 millimètres de diamètre ; grâce à du mastic de vitrier, on fixe sur cette ouverture ajustée une collerette en plas-

tique, le pourtour d'une capsule de bouteille d'eau minérale (Volvic) dont on a enlevé le fond (fig. 5). On ajoute du mastic de façon d'une part à obtenir la masse voulue à 1 centigramme près, d'autre part à constituer un lest tel que la balle ait une position d'équilibre où l'axe de l'ouverture soit horizontal. On place la cible ainsi réalisée sur une plaquette d'aluminium glissée entre la table et la plaque stratifiée (fig. 5) ; la différence de niveau entre les faces supérieures de la plaquette d'aluminium et de la plaque stratifiée est de 10 millimètres, de sorte qu'au moment du choc les centres du projectile et de la cible sont dans un même

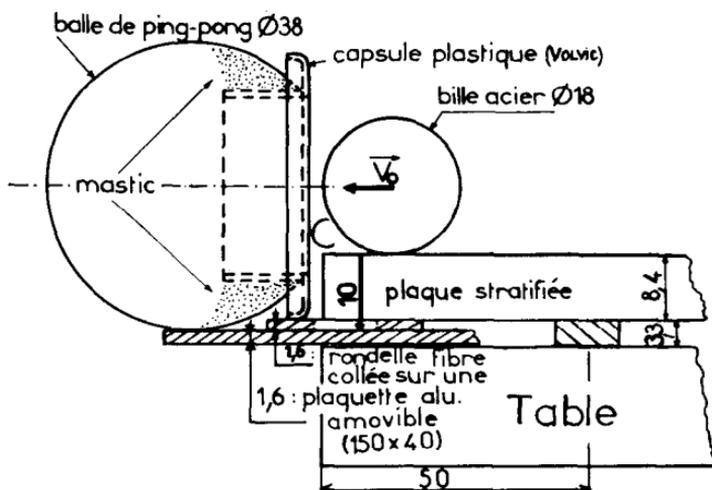


Fig. 5

plan horizontal. La bille-projectile est lancée dans exactement les mêmes conditions que pour les chocs avec la bille d'acier de 16 mm ; elle est piégée par la balle-cible et l'ensemble se comporte dans la chute comme un corps unique de masse $M + m$, bien que la bille s'agite dans la balle, comme on peut d'ailleurs l'entendre. Sur la feuille de papier du fond de la caisse, on obtient la trace I.

4. VERIFICATION DES LOIS DE CHOC.

Nous décrivons dans ce paragraphe la vérification la plus complète, celle qui implique la connaissance de résultats théoriques obtenus en se plaçant dans le référentiel du centre d'inertie ; elle est aussi la plus intéressante pédagogiquement, si les élèves ont une formation suffisante.

4. a. *Choc de deux billes en acier dur 100 C 6.* Après une série de chocs réalisés comme il vient d'être décrit (3. d), on retire la feuille garnissant le fond de la caisse ; on y trouve :

- le point A et la trace B₀ du projectile n'ayant pas subi de choc ; tous deux sont donnés par les expériences préliminaires ;
- une douzaine de couples de traces B_i et b_i, avec i = 1 à 12 ;
- la trace I due au choc parfaitement mou.

A l'instant du choc, la bille-projectile est en C ; le vecteur \overrightarrow{AB}_i est donc la portée et représente correctement la vitesse $\vec{V}_{1,i}$. Au contraire, le vecteur \overrightarrow{Ab}_i ne représente pas exactement la vitesse $\vec{V}_{2,i}$, car au moment du choc le centre de la cible ne se projette pas en A, mais en un point A_i qu'il est facile de déterminer. Si on admet que la cible est projetée dans la direction de la droite des centres à la date du choc, A_i se trouve à 17 mm de A sur la droite Ab_i (17 mm est la somme des rayons des billes) ; la portée est donc $\overrightarrow{A_i b_i}$. Mais il est beaucoup plus avantageux de représenter la vitesse $\vec{V}_{2,i}$ par un bipoint d'origine A ; on construit (3) donc le point b'_i qui est, sur la droite Ab_i, à 17 mm avant b_i ; la vitesse $\vec{V}_{2,i}$ est bien représentée par $\overrightarrow{Ab'_i}$.

Par ailleurs, la vitesse \vec{V}_0 de la bille-projectile avant le choc est représentée par la portée \overrightarrow{AB}_0 . Quant à la portée \overrightarrow{AI} , elle représente la vitesse après le choc parfaitement mou.

Si on se reporte à la théorie (§ 1. b, fig. 1), toute droite B_i b'_i doit passer par le point H tel que :

$$AH = \frac{M}{M + m} AB_0 = 0,59 AB_0.$$

La vérification est excellente : la zone des intersections mutuelles des droites B_i b'_i est très réduite ; elle comprend le point H ainsi que l'impact I (fig. 6 a).

D'ailleurs, en toute rigueur, au moment du contact des deux billes, le centre d'inertie ne se projette pas en A ; il est à 7 mm de ce point, sur un arc de cercle situé en avant :

$$\frac{m}{M + m} \cdot AA_i = \frac{7}{17} \times 17 = 7 \text{ mm.}$$

Il est donc tout à fait normal de trouver une dispersion analogue pour les intersections mutuelles.

En pratique, la correction faisant passer de b_i à b'_i a peu d'importance. Si on ne la fait pas, la vérification est encore très

(3) Il est commode d'utiliser une règle plate de 60 cm à graduations transparentes.

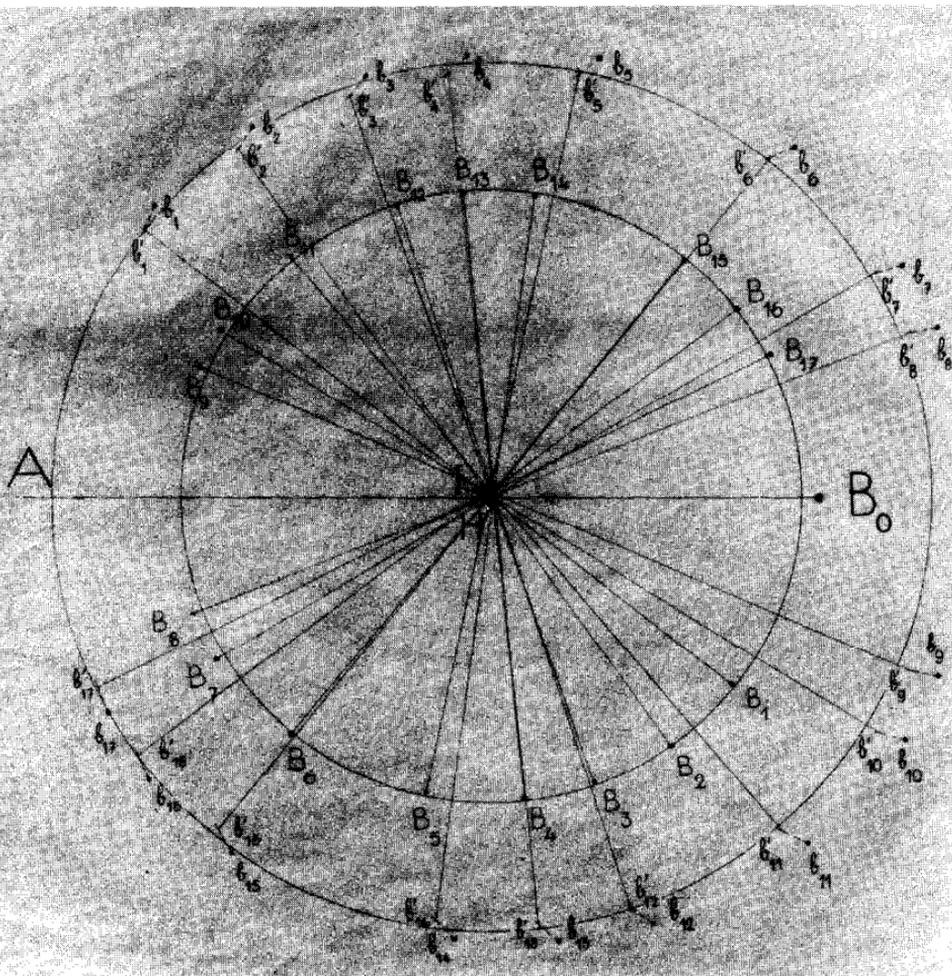


Fig. 6 a. — Choc de deux billes en acier dur 100 C 6 ;
projectile : diamètre 18 mm,
cible : diamètre 16 mm.

satisfaisante : les intersections des droites $B_i b_i$ sont dans une petite zone, voisine du point H et de l'impact I (fig. 6 b). Avec des élèves, il peut être opportun d'utiliser la facilité ainsi offerte.

Si les chocs étaient élastiques, il y aurait en outre une autre propriété. Toute vitesse $\vec{v}_{1,i}$ aurait pour norme $V_0 - V_G$; c'est-à-dire qu'on aurait : $HB_i = HB_0$; toute vitesse $\vec{v}_{2,i}$ aurait pour norme V_G , ce qui implique $Hb'_i = HA$. Autrement dit, les

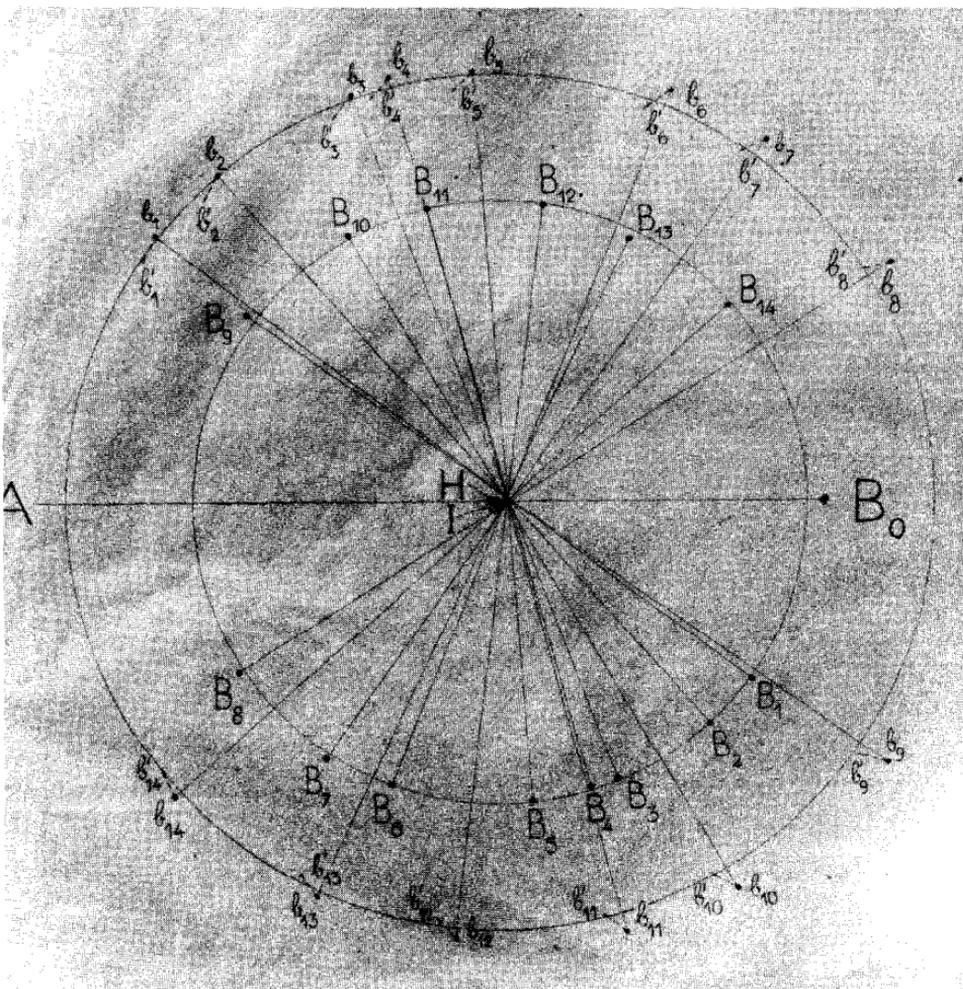


Fig. 6 b. — Choc de deux billes en acier dur 100 C 6 ;
 projectile : diamètre 18 mm,
 cible : diamètre 16 mm.

points B_i d'une part et les points b'_i d'autre part seraient sur deux cercles de centre H, le premier de rayon HB_0 , le second de rayon HA. Avec des billes en acier 100 C 6, c'est presque ce qu'on observe (fig. 6 a et 6 b) ; la vérification est assez satisfaisante pour qu'on puisse en conclure : *avec des billes en acier très dur, les chocs sont pratiquement élastiques.*

4. b. *Choc de deux billes en inox.* On opère de la même façon que dans le premier cas, les billes ayant les mêmes dia-

mètres et pratiquement les mêmes masses que celles en acier dur. Pour la commodité de l'exposé, nous allons légèrement changer les notations et désigner par $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \vec{W}_1, \vec{W}_2$ les vitesses qui étaient respectivement appelées $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{V}_1, \vec{V}_2$ et par D_i, d_i, d'_i les points correspondant à B_i, b_i, b'_i .

Tout d'abord, si on trace les droites $D_i d'_i$, on constate qu'elles convergent pratiquement en H (fig. 7) ; la vérification est aussi bonne que dans le premier cas. Soulignons que cette vérification

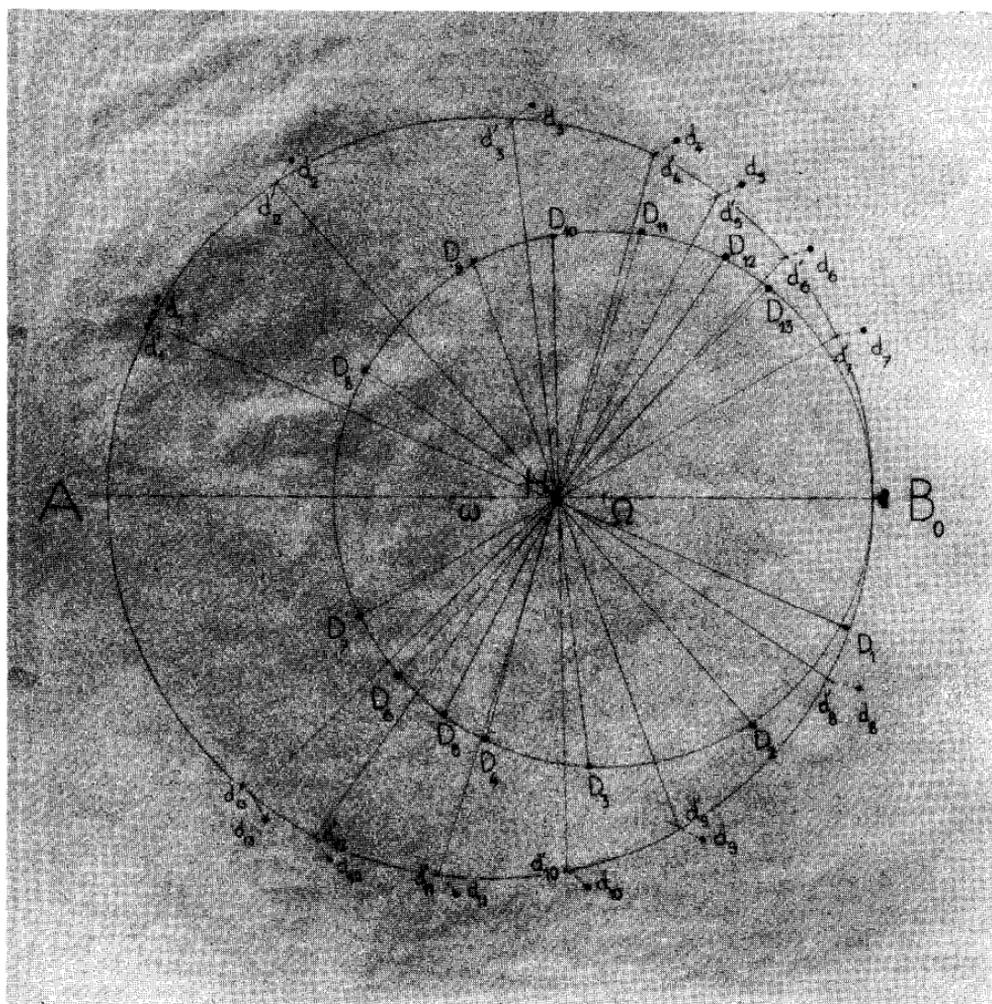


Fig. 7. — Choc de deux billes en inox ;
projectile : diamètre 18 mm,
cible : diamètre 16 mm.

ne porte que sur la conservation de la quantité de mouvement, propriété valable quelle que soit la nature du choc, élastique ou non.

Par contre, il apparaît nettement que les points d'_i d'une part et D_i d'autre part ne sont pas sur des cercles de centre H. *Le choc de deux billes en inox n'est pas élastique.* D'ailleurs, avec une loupe et même parfois à l'œil nu, on peut voir sur les billes les traces des chocs.

Toutefois, on constate un fait curieux : les points d'_i sont sur un cercle passant au voisinage de A et de centre ω ; les points D_i sont sur un autre cercle passant près de B_0 et de centre Ω ; les centres ω et Ω sont des points de la droite AHB_0 , situés de part et d'autre de H (fig. 7). On peut rendre compte de cette constatation expérimentale de la façon suivante.

Soit \vec{V}_2 la vitesse de la cible après un choc élastique (1^{er} cas) et \vec{W}_2 cette vitesse après un choc non élastique (2^{me} cas) ; si ces deux vecteurs ont la même direction, on peut poser : $\vec{W}_2 = K \vec{V}_2$; il en résulte que $\overrightarrow{Ad'_i} = K \overrightarrow{Ab'_i}$. Si K est une constante, c'est-à-dire si sa valeur ne dépend pas de la direction dans laquelle est projetée la bille-cible, les points d'_i sont sur un cercle homothétique de celui de centre H et de rayon HA. Ce cercle des points d'_i a pour centre ω et pour rayon R_2 tels que :

$$R_2 = A\omega = KAH = K \frac{M}{M+m} V_0.$$

Représentons les points A, H, B_0 , b'_i , B_i (fig. 8). Le triangle HB_0B_i est homothétique du triangle HAb'_i , le rapport d'homothétie étant m/M . Le point d'_i du côté Ab'_i , est tel que $Ad'_i = K Ab'_i$. La conservation de la quantité de mouvement dans le référentiel du centre de masse implique que D_i soit l'intersection de d'_iH avec B_0B_i ; on a bien en effet $HD_i = \frac{m}{M} Hd'_i$. Par consé-

quent $\overrightarrow{B_0D_i} = K \overrightarrow{B_0b'_i}$. Les points D_i sont bien sur un cercle homothétique de celui de centre H et de rayon HB_0 ; le centre Ω de ce cercle et son rayon R_1 sont tels que :

$$R_1 = B_0\Omega = KHB_0 = K \frac{m}{M+m} V_0.$$

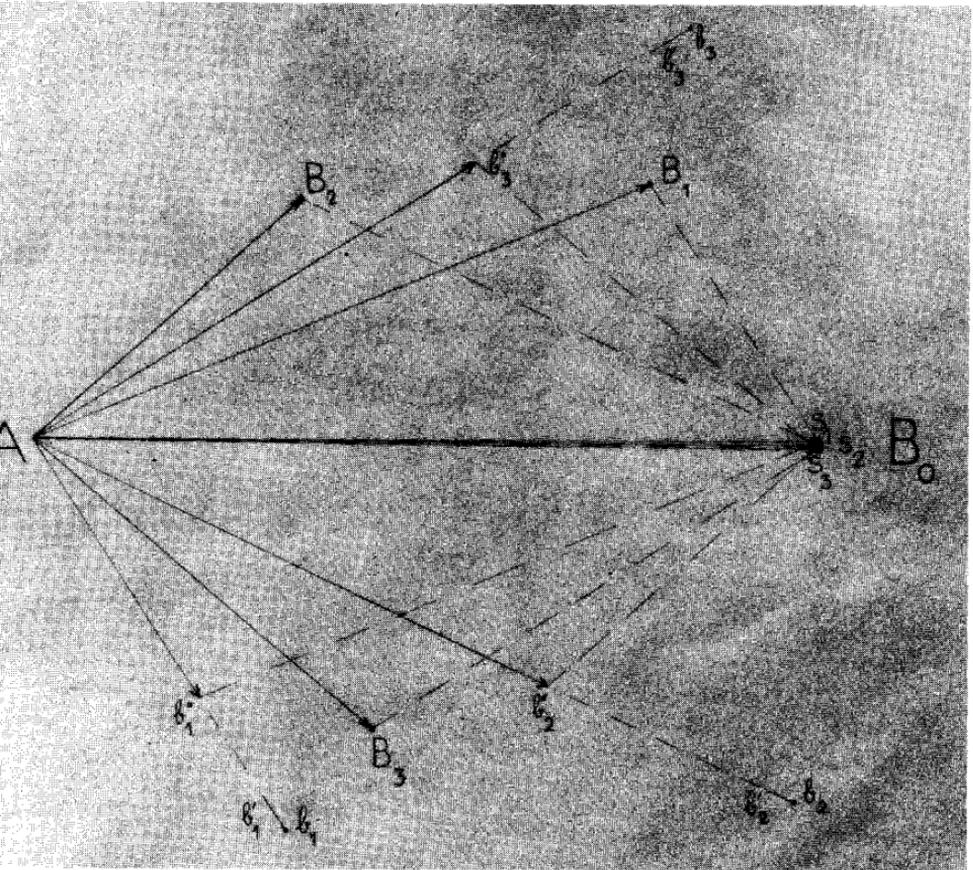


Fig. 9. — Choc de deux billes en acier 100 C 6.

Vérification de la conservation de la quantité de mouvement.

l'unité utilisée jusqu'à présent). Avec cette convention, $M = 1$ et $m = 0,7$; les portées $\overrightarrow{AB_0}$ et $\overrightarrow{AB_1}$ représentent les quantités de mouvement du projectile avant le choc et après celui-ci. Quant à la quantité de mouvement de la bille-cible après le choc, elle est représentée par $\overrightarrow{Ab''_i}$, b''_i étant le point de Ab_i tel que $Ab''_i = 0,7 Ab'_i$; si l'on préfère, on peut dire, les longueurs étant mesurées en centimètres : $Ab''_i = 0,7 (Ab_i - 1,7)$. La vérification consiste à faire la somme $\overrightarrow{AS}_i = \overrightarrow{AB}_i + \overrightarrow{Ab''_i}$ et à la comparer à $\overrightarrow{AB_0}$ (fig. 9). Les chocs pouvant être élastique ou non, on peut opérer soit avec des billes en acier dur, soit avec des billes en inox.

6. MOUVEMENT DU CENTRE D'INERTIE.

Dans toute expérience où le choc de deux billes d'acier est réalisé suivant les modalités décrites ci-dessus, une observation s'impose à tout témoin, même non prévenu : les deux billes frappent simultanément le fond de la caisse ; on n'entend qu'un seul bruit d'arrivée.

Pour des élèves de Seconde, le professeur peut fonder sur cette simultanéité observée, l'affirmation que la droite joignant les centres des billes reste horizontale durant leur chute ; à l'arrivée, le centre d'inertie G du système des billes assimilées à des points matériels est sur la droite $B_i b'_i$. Dans une série de chocs

où M, m, \vec{V}_0 sont les mêmes, les droites $B_i b'_i$ doivent concourir au point d'arrivée I du corps obtenu par un choc parfaitement mou ; ce point se déduit d'ailleurs facilement de la portée du projectile n'ayant pas subi de choc :

$$AH = \frac{M}{M + m} AB_0 = 0,59 AB_0.$$

En plus de cette illustration expérimentale de l'existence du centre d'inertie du système de deux billes, on pourra faire constater que sur la droite $B_i b'_i$ la position la plus probable de ce

point partage le segment dans le rapport voulu : $\frac{Gb'_i}{GB_i} = \frac{M}{m}$.

Pour un élève de Terminale, cela constitue une vérification intéressante des lois de la chute d'un corps. Il importe d'ailleurs de lui faire remarquer que le centre d'inertie d'un système éclaté, formé de deux billes indépendantes l'une de l'autre qui s'écartent, a le même mouvement de chute que celui d'un solide, ou encore que celui du corps assez complexe résultant du choc parfaitement mou. Au prix, il est vrai, de quelques complications pratiques non négligeables, il serait possible de surélever plus ou moins le fond de la caisse, c'est-à-dire d'opérer avec des hauteurs de chute différentes ; on pourrait ainsi obtenir des données qui, sur un graphique, correspondraient à des points prouvant le mouvement parabolique du centre d'inertie G .

7. ENERGIE DISPONIBLE LORS D'UN CHOC.

Des considérations énergétiques, possibles en classe de Première et Terminale, ont l'incontestable intérêt d'introduire une notion importante : celle d'énergie disponible lors d'un choc.

Les expériences décrites mettent nettement en évidence un fait important : obligatoirement, une partie de l'énergie cinétique initiale du projectile reste sous forme cinétique après le choc. En effet, avant le choc, l'énergie cinétique du système est celle

du projectile : $E_c = \frac{1}{2} M V_0^2$; après le choc, l'énergie ciné-

tique de translation a une valeur minimale, celle qui correspond au mouvement du centre d'inertie :

$$E'_c = \frac{1}{2} (M + m) V_G^2 = \frac{1}{2} \frac{M^2}{M + m} V_0^2 = \frac{M}{M + m} E_c.$$

L'énergie qui, lors du choc, peut être transformée en une autre forme est donc :

$$E_o = E_c - E'_c = \frac{m}{M + m} E_c.$$

Cette *énergie disponible* E_o n'est autre que l'énergie cinétique dans le référentiel du centre d'inertie. Cela résulte des considérations développées au paragraphe 1. a ; il est facile de le vérifier directement :

$$\begin{aligned} E_o &= \frac{1}{2} M (V_o - V_G)^2 + \frac{1}{2} m V_G^2 \\ &= \frac{1}{2} M V_0^2 \left[\left(1 - \frac{M}{M + m} \right)^2 + \frac{m}{M} \left(\frac{M}{M + m} \right)^2 \right] = \frac{m}{M + m} E_c. \end{aligned}$$

Il est intéressant de caractériser la non-élasticité d'un choc par la fraction de cette énergie qui est effectivement transformée. C'est en somme ce que nous avons fait en introduisant et en utilisant le facteur α ; la fraction transformée est $1 - \alpha^2$.

A propos de cette notion d'énergie disponible lors d'un choc, on peut formuler deux remarques. Dans les expériences décrites ici, la distinction entre E_c et E_o s'impose parce que la masse de la cible est inférieure à celle du projectile ; en effet $m < M$ entraîne : $E_o < E_c/2$. En particulier, dans le cas considéré ($m = 0,7 M$), on a : $E_o = 0,41 E_c$. Au contraire, dans la plupart des chocs usuels, la masse de la cible est supérieure, et même souvent très supérieure, à celle du projectile ; la distinction s'estompe. En effet, si $M/m \rightarrow 0$, $E_o \rightarrow E_c$; c'est pourquoi, dans un choc mou contre le sol ou une cible fixe, toute l'énergie cinétique du projectile se transforme en chaleur (5).

Cette notion d'énergie disponible est importante en physique des particules. Ainsi, pour que le choc d'un proton contre un nucléon donne une paire proton-antiproton, il faut que l'énergie disponible soit de 2 GeV ; pour que cette création soit possible grâce au choc d'un proton accéléré contre un nucléon d'une cible immobile, il faut que, dans le référentiel du laboratoire, l'énergie cinétique du proton soit 6 GeV. Les formules relativistes, dont l'emploi s'impose, donnent un résultat quantitativement différent de celui des formules newtoniennes, mais le phénomène est qualitativement le même.

(5) Dans ce cas, la masse de la cible est pratiquement infinie et les référentiels du laboratoire et du centre d'inertie sont confondus.

8. CHOC SIMULTANÉ CONTRE DEUX CIBLES.

Lorsqu'on s'intéresse au mouvement du centre d'inertie d'un système éclaté, il est avantageux d'étudier le choc simultané, par une bille-projectile de 18 mm, de deux billes-cibles, l'une de 16 mm et l'autre de 12 mm ; leurs masses sont respectivement avec l'unité arbitraire (§ 3. a) : $M = 10$, $m = 7$, $m' = 3$. Le repérage préliminaire des traces A et B₀ se fait comme précédemment. Pour obtenir le choc double désiré, on dispose les deux billes-cibles sur des cales convenables, dont les épaisseurs sont 1 millimètre et 3 millimètres, de telle sorte qu'elles soient en contact avec la bille-projectile placée en C (fig. 10). Convenablement lan-

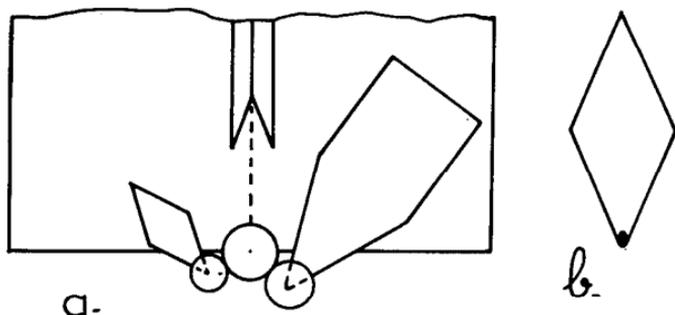


Fig. 10 a. — Disposition générale pour le choc de deux billes-cibles.
b. — Cale pour bille de 12 mm (épaisseur 3 mm).

cée, la bille-projectile heurte simultanément les deux cibles ; on obtient, sur la feuille placée sur le fond de la caisse, 3 traces : B, b, p. On peut compléter l'expérience en provoquant un choc parfaitement mou ; pour cela, il suffit de disposer d'une balle de ping-pong, traitée comme il a été dit (§ 3. e), mais dont le lest de mastic est tel que la masse de cette cible soit :

$$m + m' = M = 10.$$

Sur la feuille retirée du fond de la caisse, on construit le barycentre G des points B, b, p affectés de masses convenables, respectivement 10, 7 et 3. On constate que le point G ainsi obtenu est très voisin du milieu H du segment AB₀ (fig. 11) et de la trace du choc parfaitement mou. Comme au § 4. a, une correction de la représentation des vitesses des billes-cibles après choc serait possible ; en tenant compte des rayons des billes, les portées seraient en centimètres :

$$Ab' = Ab - 1,7 \quad \text{et} \quad Ap' = Ap - 1,5 ;$$

en fait, cette correction ne paraît pas utile.

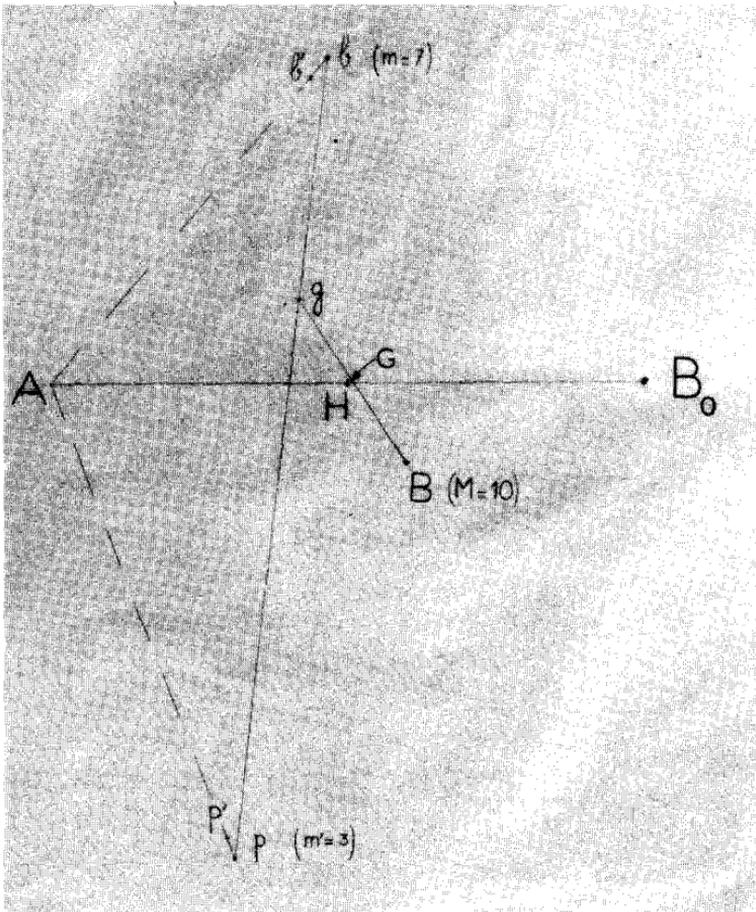


Fig. 11. — Centre d'inertie du système de 3 billes.

La conclusion rejoindra l'introduction. Un appareillage simple et robuste, permet aux élèves des lycées de vérifier ou d'illustrer, de façon assez précise pour être probante, quelques faits essentiels et des notions importantes :

- conservation de la quantité de mouvement ;
- lois du choc dans le référentiel du centre d'inertie ;
- mouvement du centre d'inertie d'un système éclaté formé de deux ou trois solides indépendants ;
- énergie disponible lors d'un choc.

Nous avons centré notre exposé sur des vérifications graphiques des lois du choc ; dans un article ultérieur, nous déve-

lopperons des calculs qui, fondés sur des considérations énergétiques, permettent des vérifications numériques.

Je tiens à remercier MM. Hubert GIÉ et Georges GUINIER. M. GIÉ, par ses encouragements, m'a aidé à persévérer dans ce travail de recherche. M. GUINIER a porté un grand intérêt à cette étude et a contribué directement à l'élaboration de la forme finale de cet article. Ses conseils, ses nombreuses suggestions et critiques m'ont considérablement aidé et encouragé dans mon travail.

Elie MULLER,
(Lycée de Roussillon - Isère).

Une expérience illustrant la conservation de l'énergie.

MATERIEL.

Mobile JEULIN, générateur d'impulsions, tableau de classe ou tableau mobile.

Le principe de la manipulation consiste à utiliser un mobile JEULIN en pendule, le mobile muni d'une surcharge étant suspendu verticalement le long d'un tableau de classe. La mise en service de la soufflerie permet d'obtenir des oscillations dans un plan vertical avec frottements réduits.

Sur le tableau on fixera à l'aide de ruban adhésif ou d'aimants une feuille d'enregistrement, face carbonée en dessous, et on glissera entre les deux une feuille de papier ordinaire.

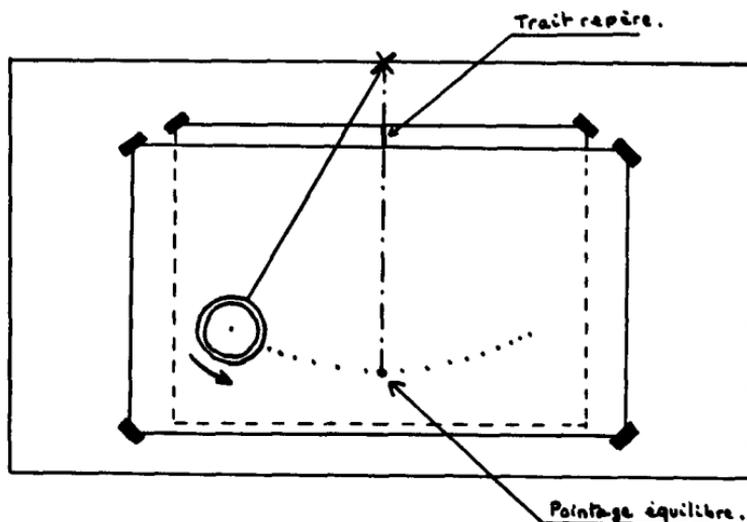


Fig. 1. — Vue d'ensemble.

MANIPULATION.

Réglage initial :

Le fil de suspension doit être légèrement incliné de façon à ce que le mobile ne décolle pas du tableau. En outre, un réglage de la position de la surcharge sur laquelle est noué le fil est nécessaire de manière à ce que le mobile oscille en restant bien parallèle au tableau. Sa position étant déterminée, on l'immobilise (en translation) avec une allumette ou du ruban adhésif.

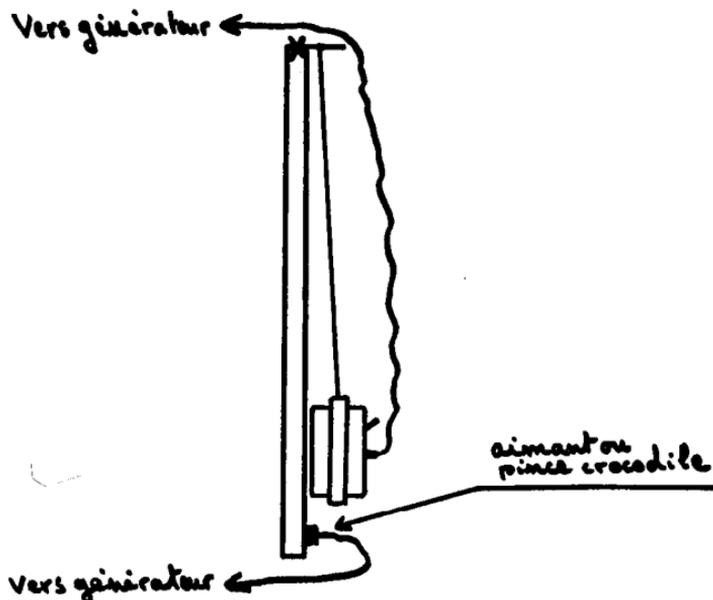


Fig. 2. — Vue de profil.

Repérage de la position d'équilibre :

Mettre la soufflerie en marche et repérer la position du fil à l'aide d'une équerre.

Régler le générateur sur 60 ms, et pointer la position d'équilibre. On obtiendra ainsi sur la feuille la verticale en joignant ces deux repères.

Enregistrement :

Ecarter le mobile en veillant qu'au cours des oscillations il ne tourne pas sur lui-même. Enregistrer une demi-oscillation en réglant le générateur sur 20 ou 40 ms.

L'enregistrement est rapide et chaque groupe peut travailler sur son propre document.

Exploitation :

Sur le document, tracer la verticale puis à l'aide d'une équerre une horizontale quelconque (ce qui illustre bien pour les élèves l'arbitraire de l'origine des cotes pour le calcul de E_p). On peut, de cette manière, mesurer les cotes pour chaque position du centre de masse, les vitesses étant calculées par la méthode habituelle.

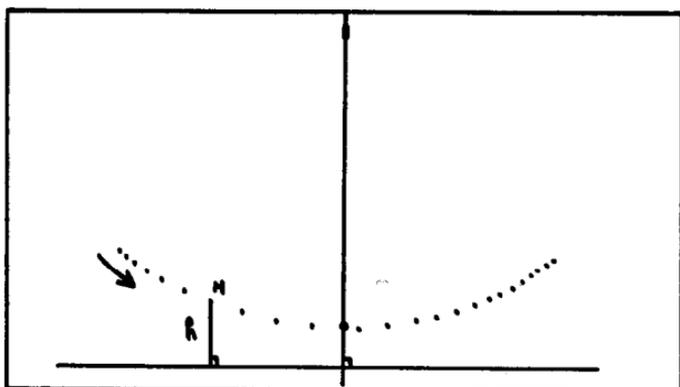


Fig. 3. — Exploitation du document.

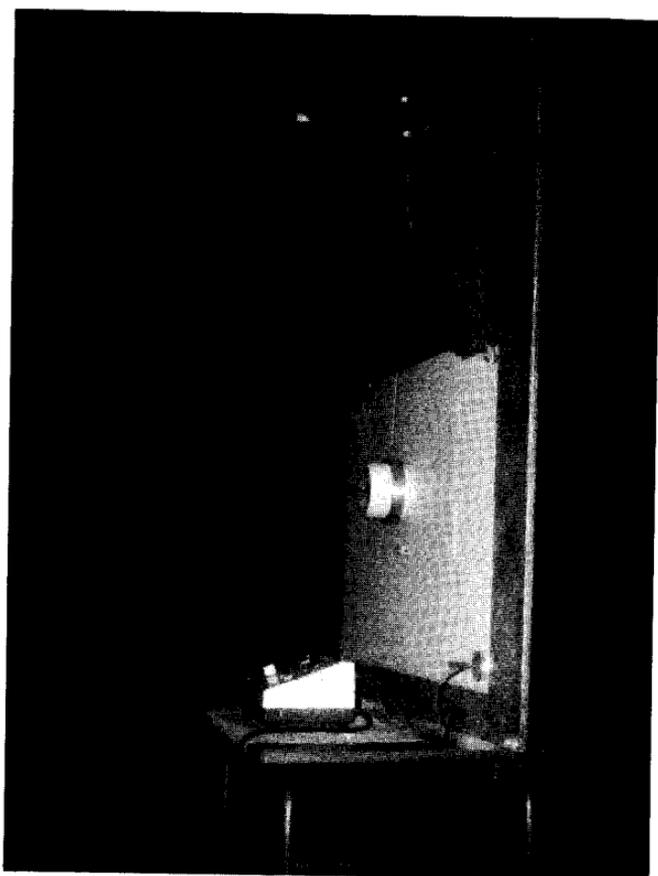


Photo n° 1

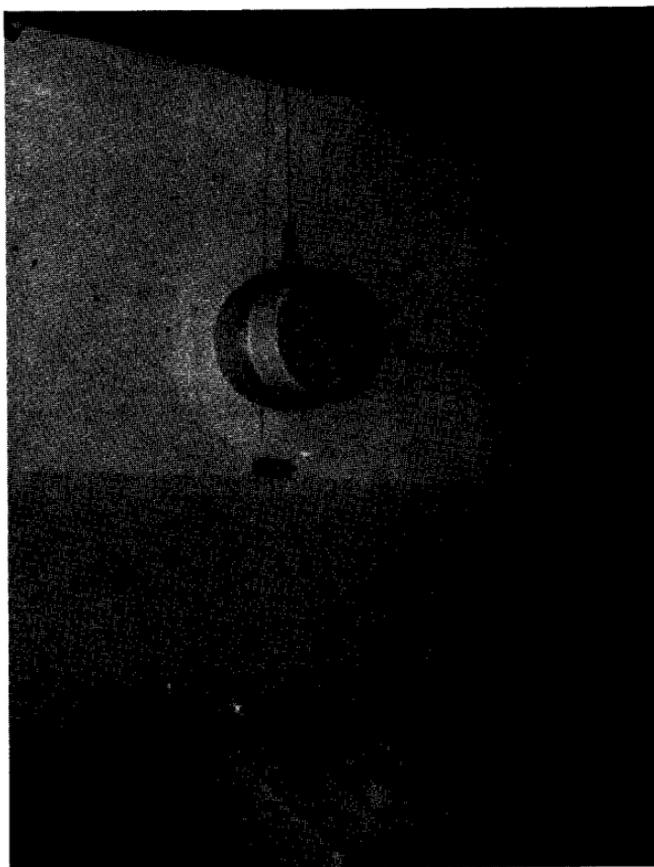


Photo n° 2

Calculs :

Pour chaque point, on peut calculer l'énergie cinétique et l'énergie potentielle du mobile et vérifier ainsi la conservation de l'énergie.

Résultats :

Les enregistrements réalisés pour l'instant par 70 élèves ont conduit à une bonne vérification : la conservation est établie avec une précision variant de 1 à 4 %.

Michel BEYER,
Régis BOURBONNEUX,
Aide de laboratoire
(Lycée Rodin - Paris).

Un auxiliaire précieux dans notre enseignement : le ressort à boudin.

QUELQUES RENSEIGNEMENTS D'ORDRE PRATIQUE.

On trouve assez difficilement dans le commerce, des ressorts réalisant les performances idéales pour nos multiples expériences de cours et de travaux pratiques. Cette année, beaucoup de collègues enseignant en 1^{re} ont pu s'en rendre compte en recherchant le « bon ressort » pour la manipulation portant sur la conservation de l'énergie mécanique d'un pendule élastique réalisée avec un autoporteur.

A Nogent-le-Rotrou est implantée une petite usine dont la seule vocation est la fabrication de ressorts de toutes formes et de toute nature. A notre demande et sur nos indications, elle est en mesure de fournir les modèles de ressorts suivants :

(Tous sont faits de spires de 15 mm de diamètre ; ils ont une longueur au repos variant de 6 à 8 cm ; les 4 premiers types, de R₁ à R₄ sont à *spires non jointives* ; seuls R₅ est à spires jointives).

R₁ ; diamètre du fil 9/10^e de mm ; raideur de l'ordre de 40 N/m

R₂ ; diamètre du fil 8/10^e de mm ; raideur de l'ordre de 25 N/m

R₃ ; diamètre du fil 7/10^e de mm ; raideur de l'ordre de 15 N/m

R₄ ; diamètre du fil 5/10^e de mm ; raideur de l'ordre de 2,5 N/m

R₅ ; diamètre du fil 8/10^e de mm ; raideur de l'ordre de 25 N/m
avec un seuil de traction de l'ordre de 1 N.

Remarques :

* Dans l'ensemble, ces ressorts ne sont pas fragiles. C'est R₁ qui est le plus fragile ; par contre R₄ supporte allégrement un allongement de plus de 50 cm ; R₂ peut être chargé à 10 N sans déformation permanente. Or, en général, en Travaux pratiques, nous demandons à nos élèves de ne pas dépasser 5 N avec ce type de ressort.

* Nous avons inclus dans cette gamme, un ressort à spires jointives car nous pensons que le graphe d'étalonnage $\Delta l = \varphi(f)$ est intéressant à cause de son analogie avec la caractéristique d'une diode à jonction que nos élèves manipulent en électronique.

* Avec le ressort R_4 , on a le type de ressort donnant entière satisfaction pour l'étude en 1^{re} de l'énergie mécanique d'un pendule élastique autoporté.

* On reconnaît assez facilement au premier coup d'œil les ressorts R_4 et R_5 . Par contre R_1 , R_2 et R_3 ont une certaine ressemblance. C'est pour permettre à l'utilisateur de distinguer sans peine ces 3 types que nous avons demandé au fabricant de galvaniser légèrement les ressorts de type R_2 , ce qui leur donne un aspect brillant qu'ils sont seuls à posséder.

* L'usine ne livre pas de ressorts au détail ; elle les livre par séries de 10 d'un même type au prix de 25 F la série, toutes taxes comprises, franco de port et d'emballage. La série de type R_4 est plus coûteuse ; elle vaut 50 F.

* Il ne sera pas pris en considération les commandes d'un montant inférieur à 100 F. Le prix de la gamme complète s'élève à 150 F. Remarquons que pour certains T.P. comme l'étude d'un pendule élastique avec deux ressorts en opposition, de l'équilibre d'un corps sous l'action de trois forces concurrentes, des associations de ressorts en série ou en parallèle, etc., il peut être souhaitable, afin d'équiper 10 groupes d'une même séance de T.P. de posséder certaines séries en double — les plus utilisés étant R_2 et R_3 . Dans ce cas, vous voyez que pour la somme de 200 F, le laboratoire est équipé de façon satisfaisante.

* Ces prix ne sont pas élevés car la liaison est directe entre le fabricant et l'utilisateur.

Nous ignorons le succès que ces renseignements auront auprès des responsables de laboratoires. Il est certain que si le fabricant avait été assuré de livrer au moins un millier de ressorts de chaque type, les prix pratiqués auraient été sensiblement plus bas.

* Adresse du fabricant :

SEFARD, route de Thiron
28400 Nogent-le-Rotrou.

UNE MANIPULATION DU NOUVEAU PROGRAMME DE SECONDE, QUI FAIT APPEL AU RESSORT A BOUDIN.

Lors de l'une de nos réunions de concertation entre professeurs de physique d'un même secteur, un collègue a regretté que le nouveau programme de mécanique en Seconde ne permette qu'un petit nombre de manipulations de type classique, c'est-à-

dire des manipulations au cours desquelles chaque groupe travaille sur son propre montage et exécute une série de mesures qu'il exploite...

Certes, cette remarque est juste, mais heureusement, il reste des possibilités de manipulations simples du type classique auxquelles on ne pense pas toujours ; en voici un exemple.

Mesure dynamique d'une masse.

MATÉRIEL : Support universel, ressorts, plateau, masses marquées, Roberval, chronomètre.

L'expérience consiste à noter la durée θ d'un nombre donné d'oscillations du ressort qui supporte le plateau chargé des masses m .

L'élève dresse un tableau, puis dessine le graphe :

$$\theta = f(m).$$

Il utilise ensuite ce graphe pour déterminer la masse inconnue d'un objet personnel et il contrôle le résultat à l'aide d'une Roberval.

Ce montage simple, pratiqué en classes terminales avec un objectif différent, exige peu de matériel. Si l'on dispose d'une gamme convenable de ressorts, il est possible de réaliser des montages non identiques aux performances équivalentes. Par exemple, si, pour conduire plus facilement sa leçon, le professeur désire que tous les groupes réalisent des pendules élastiques de raideur comprise entre 25 et 30 N/m, on prendra R_2 seul, ou bien 2 ressorts R_3 montés en opposition puisque dans ce cas, les deux raideurs s'ajoutent, ou bien R_2 en opposition avec R_4 , ce dernier ressort étant bien entendu en dessous du plateau. Les montages en opposition présentent, c'est bien connu, l'avantage d'éviter les balancements intempestifs et nuisibles du plateau, quand le lancement a été mal fait ou qu'on a imprimé au départ une amplitude trop grande.

D'autre part, nous sommes en Seconde avec des élèves qui font leurs premiers pas en physique. Cette manipulation peut être l'occasion de donner une foule de renseignements utiles à un expérimentateur débutant. Par exemple :

La technique du chronométrage :

Dans leur majorité, en début de classe de Seconde, les élèves n'ont encore jamais manipulé un chronomètre manuel.

C'est le moment d'inculquer les principes d'une bonne technique de chronométrage.

Après avoir indiqué le rôle des deux boutons, il faut apprendre aux élèves à enclencher et à stopper la rotation de l'aiguille et ce, d'un mouvement nerveux, sec, rapide, de façon à réduire au maximum l'équation personnelle de l'expérimentateur. (Ainsi procédaient les chronomètres officiels dans les épreuves sportives avant l'introduction du chronométrage électronique). On est frappé de la mollesse des réactions de certains de nos élèves.

Beaucoup de nos jeunes expérimentateurs ne savent pas non plus compter correctement des oscillations et *a fortiori* si leur fréquence est un peu trop élevée.

Une faute courante consiste à dire, ou à penser « un » à l'instant de l'enclenchement alors que la première oscillation commence seulement.

Et que d'erreurs dans le décompte ! Un « truc simple » consiste à ne jamais utiliser les nombres au-delà de 10. Au lieu de 11, on repart à un, tout en levant un doigt. Ainsi, on compte sans difficultés jusqu'à 100 et on peut opérer sans erreur jusqu'à des fréquences de 2 ou 3 Hz selon la qualité et l'application de l'expérimentateur. Il est bien d'ailleurs de compter une première dizaine pour acquérir le rythme — un musicien appelle cela « une mesure pour rien » — et on enclenche à 10 de cette série d'essai, de sorte que la faute signalée précédemment est automatiquement évitée.

Après ces considérations, pour apprécier si tout le monde a compris, on rassemble la vingtaine d'élèves du groupe autour d'un même montage. Chacun est équipé d'un chronomètre, y compris, bien sûr, le professeur.

On décide du chronométrage d'un nombre donné d'oscillations. Chacun fait sa mesure et on confronte les résultats !

Le premier essai est édifiant !... 2 ou 3 élèves au maximum présentent un résultat correct. On trouve toute la gamme des fautes possibles, y compris celle qui consiste à confondre les boutons, à ne pas se rendre compte que le chronomètre est gradué en $1/5^e$ de seconde et non en $1/10^e$, etc.

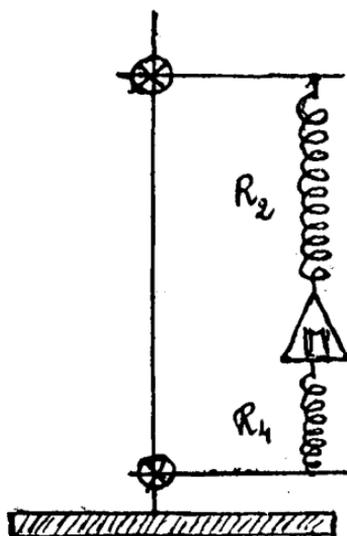
On recommence. Il faut bien 4 ou 5 essais de ce genre pour être sûr que la quasi-totalité de la classe est capable de chronométrer correctement.

Notons que l'élève qui aura compris avant le dernier essai, pourra remarquer que pour ses essais réunis, l'aiguille de son chronomètre affiche presque toujours le même résultat, ou un résultat en différant au plus d'un cinquième de seconde. Il pourra alors méditer sur la précision de la mesure d'un temps à l'aide d'un chronomètre manuel gradué en cinquièmes de seconde.

Il en conclura, par conséquent, que pour obtenir une précision de l'ordre du centième sur la valeur de θ , il ne faudra pas mesurer de temps inférieurs à une vingtaine de secondes.

Le lancement du plateau :

Après que l'élève aura constaté que la période des oscillations du ressort ne dépend pas de l'amplitude imprimée au départ, il lui sera très vivement conseillé de ne donner que des amplitudes faibles, s'il veut travailler avec un seul ressort.



Avec les irréductibles, il faudra recourir à l'association de 2 ressorts en opposition en leur faisant constater que la période des oscillations ne dépend pas de la distance entre les deux tiges horizontales du support universel.

L'association $R_2 - R_4$ est préférable à l'association $R_3 - R_3$ qui, pour une même charge demande une plus grande longueur de support.

Un tableau de mesures visant à utiliser une bonne échelle pour le graphe :

Il faut apprendre à nos élèves à choisir pour le graphe une échelle astucieuse, c'est-à-dire une échelle qui va permettre l'utilisation de la quasi-totalité de la surface de la feuille de papier millimétré, et de traduire facilement les valeurs mesurées en coordonnées, ce qui impose de bien choisir ses mesures.

Supposons que l'on utilise le ressort R_2 qui supporte très aisément une charge de masse 500 g placée sur le plateau.

Ce sera notre charge maximale avec laquelle nous ferons notre première mesure. En adoptant cet ordre décroissant des mesures, les élèves opèrent d'abord avec des oscillations lentes, donc plus faciles à suivre. Ils s'entraînent alors à chronométrer dans la région la plus facile.

La feuille de papier millimétré étant du modèle courant : 20 cm \times 30 cm, nous adoptons le grand axe de 30 cm comme axe des masses (axe des abscisses) et nous le traçons au bas de la feuille.

Nous plaçons l'origine O des coordonnées à 5 cm de l'extrémité gauche. Avec comme échelle des masses 5 cm pour 100 g, le point correspondant à $m = 500$ g est le point le plus à droite du grand axe.

L'axe des temps mesure 20 cm. Pour avoir une échelle simple, on pourrait mesurer, avec la charge de 500 g un temps égal ou légèrement inférieur à 20 s, mais ce temps de 20 s est, compte tenu de la précision du chronomètre, un peu court, d'autant que les valeurs de ϕ qui suivront seront encore plus courtes. Donc, adoptons un nombre d'oscillations dont la durée est égale ou légèrement inférieure à 40 s.

Avec cette échelle des temps 20 cm pour 40 s, 1 millimètre correspond à $1/5^e$ de seconde qui est justement la précision de nos mesures.

Ci-après, voici le tableau des mesures obtenues par un groupe d'élèves, expérimentateurs sérieux et appliqués.

Le nombre d'oscillations choisi pour obtenir une valeur de ϕ proche de 40 s est de 40 oscillations.

Ces résultats sont très corrects.

Mg	ϕ s	Représentation de ϕ en cm
500	36,8	18,4
400	33,4	16,7
300	29,8	14,9
200	25,6	12,8
100	20,4	10,2
50	17,2	8,6
00	13,4	6,7

Pour les mesures de ϑ jusqu'à $m = 100$ g, une seule mesure bien faite suffit. Pour les deux dernières, il peut être prudent de recommencer plusieurs fois, car la fréquence des oscillations est supérieure à 2 Hz.

Le professeur ayant, en dehors de la manipulation, mesuré la raideur du ressort utilisé par ces élèves : $k = 26,8$ N/m, la masse du plateau : $m_o = 70,3$ g et celle du ressort : $m'_o = 10,3$ g, il lui a été possible de comparer les valeurs de ϑ mesurées par les manipulateurs avec celles calculées à l'aide de la formule

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\mathcal{M}}{k}}, \quad \mathcal{M} \text{ valant dans ce cas où le ressort est}$$

$$\text{suffisamment chargé : } m + m_o + \frac{m'_o}{3}.$$

Voici le tableau comparatif.

ϑ (mesuré) _s	ϑ (calculé) _s
36,8	36,8
33,4	33,4
29,8	29,7
25,6	25,4
20,4	20,2
17,2	17,1
13,4	13,2

On peut remarquer que la comparaison est tout à fait satisfaisante.

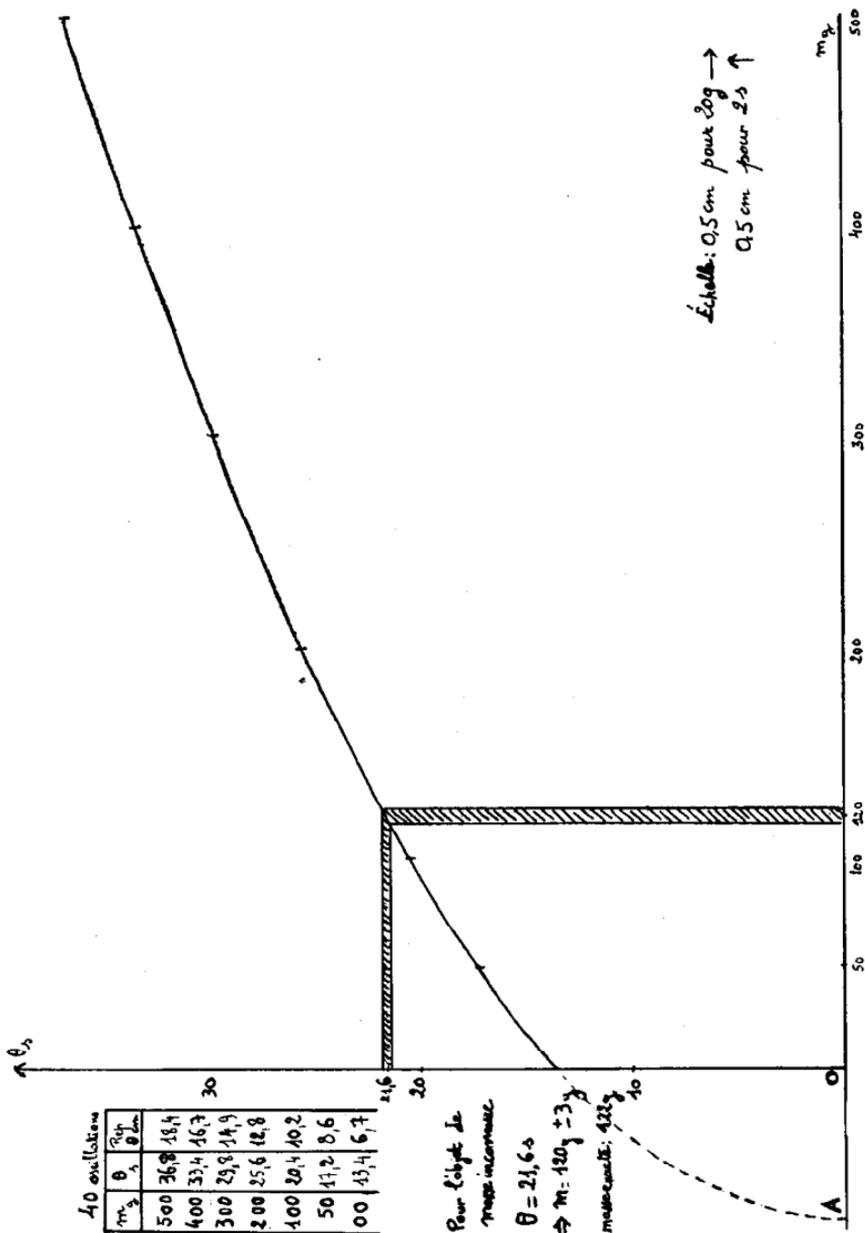
Pourtant, ce n'est pas une performance.

Les conditions pour obtenir de tels résultats sont au nombre de trois : un bon chronomètre, une bonne technique, des expérimentateurs appliqués.

Le tracé du graphe :

Il faut que l'élève abandonne l'idée mathématique qu'il se fait d'un graphe : c'est-à-dire une ligne qui passe d'une façon absolument rigoureuse par les points obtenus.

Dans la présente manipulation, où la masse peut être considérée comme exacte et la valeur de ϑ erronée au maximum de



$1/5^e$ de seconde ($1/5^e$ de seconde correspond sur le graphe à 1 mm), on va faire correspondre à chaque couple de valeurs m et ϑ un petit segment de 2 mm de longueur parallèle à l'axe des ordonnées. C'est le domaine d'incertitude.

Nos élèves doivent comprendre qu'il leur faut tracer une courbe harmonieuse coupant tous ces domaines... à moins d'accidents dans certaines mesures, ou d'étourderies.

Il est d'ailleurs amusant pour le professeur de voir que des élèves qui ont de très bons résultats, sont désolés de ne pouvoir faire passer une droite coupant tous les domaines d'incertitude !

La mesure d'une masse inconnue :

La précision sur ϑ étant de $1/5^e$ de seconde, nos élèves traceront sur le graphe une bande horizontale de 2 mm de largeur. La bande verticale qui en découle est plus large et d'autant plus large que la masse inconnue est proche de 500 g.

Voici les résultats du groupe auquel nous nous sommes intéressés dans cet article :

ϑ pour l'objet de masse inconnue : 21,6 s, ce qui entraîne $m = 120 \text{ g} \pm 3 \text{ g}$, m mesurée avec une Roberval : 122 g.

Un complément :

Si l'on dispose encore d'un peu de temps, on pourra proposer aux élèves une extrapolation de la courbe dans le domaine des masses négatives, jusqu'à l'intersection au point A de notre graphe avec l'axe des m .

Pour faciliter ce travail un peu délicat, le professeur indiquera que la tangente à la courbe en A doit être parallèle à l'axe des ordonnées.

Quelle valeur numérique est représentée par OA ?

A quelle masse correspond-elle ?

Question un peu difficile. Les réponses sont rares et hésitantes.

On procède à la pesée du plateau... et tout s'éclaire.

Certes, la valeur extrapolée représente en réalité la masse du plateau m_o augmentée de $\frac{m'_o}{3}$, mais étant donné la faible valeur de $\frac{m'_o}{3}$ par rapport à m_o : 3 g environ contre 70 g et la précision limitée de l'extrapolation, on peut passer ce détail sous silence.

Si l'on veut ne pas passer ce détail sous silence, on fait alors observer que le ressort est capable de vibrer même s'il ne supporte aucune charge. Donc la valeur de OA représente en réalité la masse du plateau augmentée de la « participation » du ressort.

Pour étudier les vibrations du ressort non chargé, il faut fixer son extrémité supérieure à la tige, en utilisant, par exemple, un morceau de scotch. Les oscillations sont rapides. Pas question de les compter directement !

Alors, voilà une belle occasion d'utiliser le stroboscope électronique que l'on a déjà présenté à nos élèves de seconde et de s'en servir pour faire une mesure de fréquence.

On concentre alors l'attention de toute la classe sur le montage d'un groupe.

Afin d'éviter les tâtonnements dans le réglage du stroboscope, il est intéressant de faire un calcul de la fréquence attendue. Bien sûr, ce calcul, le professeur le fait pour lui-même. Il ne dira pas à ses élèves que la participation d'un ressort non

chargé est égale à $\frac{m'_0}{2,47}$, comme cela découle de la formule

$$T = 4 \sqrt{\frac{m'_0}{k}} \quad (\text{voir le B.U.P. n}^\circ 532 \text{ de février 1980) alors}$$

qu'elle n'est plus que $\frac{m'_0}{3}$ dès que la charge est suffisante.

Avec le matériel du groupe auquel nous nous sommes intéressés, le calcul prévoit 12,8 Hz. L'expérience montre que lorsque l'immobilité apparente du ressort est obtenue, la graduation du stroboscope indique une fréquence comprise entre 12,5 Hz et 15 Hz, mais très proche de la première valeur.

Certes, le ressort seul a sur le support, un comportement désagréable qui manque de régularité ; c'est pourquoi, si l'on désire discipliner son mouvement et lui imprimer une plus grande amplitude, il suffit de monter deux ressorts identiques en opposition directe. Le réglage du stroboscope pour l'ensemble des deux ressorts est le même que pour un ressort seul. En effet, avec l'association, les masses des deux ressorts s'ajoutent et les raideurs s'ajoutent également.

C. GUILLON,

(Lycée Rémi-Belleau - Nogent-le-Rrotrou).

Les vertus extraordinaires de la bobine de rail (suite)

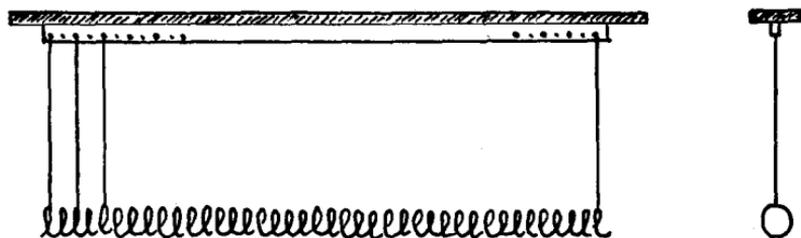
Dans le numéro 621 du B.U.P. (février 1980), nous vous avons présenté la « bobine de rail » ; nous vous avons signalé qu'elle se révélait très utile pour illustrer expérimentalement les chapitres du nouveau programme de 1^{re} traitant de l'énergie mécanique.

Grâce à une « astuce » relevée chez nos collègues du lycée de Dreux, cette même bobine de rail fait étalage de qualités non moins grandes dans le domaine de la propagation des divers ébranlements et ondes...

L'ASTUCE DES COLLEGUES DE DREUX.

Principe du montage :

Suspendre la bobine en se servant d'un certain nombre de fils comme le montre le schéma ci-après.



Voici les caractéristiques de ce que nous avons réalisé à Nogent-le-Rotrou.

Nous avons choisi une bobine B_2 ($\varnothing = 80$ mm).

Longueur des fils de suspension : 1,70 m.

Nous amarrons 1 spire sur 6.

Le support est fait d'une baguette de contreplaqué de 5 mm d'épaisseur et de 7 cm de largeur que nous avons renforcée en clouant de part et d'autre, à la partie supérieure un liteau carré de 3 cm de côté.

Le long du bord inférieur de la baguette, nous avons pratiqué des trous de 5 en 5 cm, mais nous n'utilisons qu'un trou sur deux : il y a donc un fil tous les 10 cm.

Les fils sont noués. Peut-être que nous équiperons, dans l'avenir, l'extrémité supérieure de ceux-ci de petits crochets, ce qui permettrait de modifier la tension de la bobine.

Toutes ces caractéristiques ne sont que des indications afin d'éviter les tâtonnements. Chacun pourra envisager de multiples modifications. Avec des tensions plus fortes, la bobine, c'est évident, relève davantage du nez à ses extrémités quand ces dernières ne sont pas maintenues.

En utilisant les valeurs numériques que nous vous livrons — mais nous n'en avons guère testé d'autres — nous vous affirmons que « ça marche très bien » !

Dans un premier temps, nous avons monté une bobine entière sur un support de plus de 4 mètres.

L'installation, un peu encombrante, est restée en place dans la salle de travail qui jouxte notre « ampli ». Elle a permis de faire de nombreux essais et tous, mes collègues et moi-même, l'avons utilisée immédiatement et à plusieurs reprises avec des groupes d'élèves effectuant des travaux pratiques.

Ensuite, nous avons réalisé un modèle plus court (à peine 3 mètres), aux mêmes caractéristiques, qu'il est possible d'installer d'un bout à l'autre de la grande table de la salle de physique. Deux montants équipés à leur base d'une équerre peuvent être amarrés verticalement à la table grâce à une presse. Ils soutiennent le support de la bobine qui culmine (le support) au niveau du plafond.

La partie inférieure de la bobine est à une dizaine de centimètres au-dessus de la table.

Le montage et le démontage de cet ensemble ne demandent que quelques minutes.

CE QUE L'ON PEUT FAIRE.

— L'amortissement étant très faible, on peut noter lors de la propagation d'un ébranlement un grand nombre d'aller et retour.

— C'est aussi bon avec un ébranlement transversal qu'avec un ébranlement longitudinal.

— Résultats très convaincants lors de la réflexion sur extrémité fixe ou sur extrémité libre.

— Il est facile de faire des mesures précises de célérité de propagation en se servant de l'horloge à affichage équipée de ses deux cellules. Nous disposons les cellules en dessous de la bobine, sur la table sans aucun support et nous coupons chaque faiseau à l'aide de petits morceaux de bois — genre allumette ordinaire — fendus et coincés dans les spires choisies. Les résultats sont excellents.

En faisant pivoter de 90° les cellules, on passe instantanément de la mesure de la célérité d'un établissement transversal à celle de la célérité d'un ébranlement longitudinal.

Cela permet de faire immédiatement des comparaisons.

— Intéressant aussi de voir ce qui se passe quand deux ébranlements provoqués simultanément à chaque extrémité se croisent.

— Pour la transmission d'un ébranlement d'un milieu dans un autre différent, il suffit d'alourdir les spires sur une fraction de la longueur.

Il n'est pas nécessaire de les alourdir toutes... Dans un premier temps on peut n'alourdir que celles qui sont situées sous les fils de suspension, puis les intermédiaires...

Pour ce faire, il y a sûrement beaucoup de moyens depuis la vulgaire pince à linge, lestée ou non, jusqu'au simple morceau de bois dans lequel on pratique une fente de largeur légèrement inférieure à l'épaisseur des spires...

— Obtenir des ondes stationnaires est un jeu d'enfant. Il est bien d'expérimenter successivement, les deux extrémités étant fixes, puis l'une d'elles étant libre. Avec un peu de maîtrise et d'entraînement, on fait varier le nombre de fuseaux, de même qu'on obtient aisément des ondes stationnaires longitudinales.

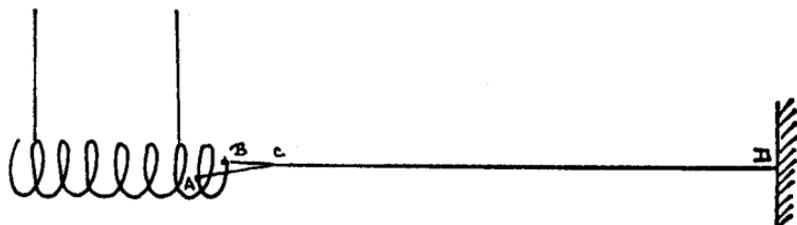
Et chacun fera sans doute ses propres découvertes. La bobine de rail qui n'a pas encore livré tous ses secrets n'a pas fini de nous étonner!!!

UN TRUC POUR QU'UNE EXTREMITE DE LA BOBINE SOIT LIBRE.

Quand elles ne sont pas maintenues, les extrémités de la bobine ont une fâcheuse tendance à « relever le nez » et dans ces conditions, les expériences de réflexion sur extrémité libre sont très mauvaises.

Comment faire pour éviter cet ennui ?

Un truc simple consiste à attacher la dernière spire à un fil suffisamment long (quelques mètres) et à tendre ce fil horizon-



talement suivant l'axe de la bobine jusqu'à ce que le fil qui supporte la dernière spire perde son inclinaison et devienne vertical.

Un bout de fil d'une trentaine de centimètres est noué à ses deux extrémités en deux points diamétralement opposés de la dernière spire, puis le long fil est attaché en C d'une part et au point fixe D d'autre part.

Tout se passe alors comme si l'extrémité de la bobine était parfaitement libre.

Quand l'installation comporte des montants verticaux pour soutenir le support de la bobine, ces montants peuvent être utilisés pour immobiliser les extrémités de la bobine. Par contre, ils sont un obstacle pour permettre à ces dernières d'être libres suivant la technique exposée ci-dessus.

C'est pourquoi nous avons ménagé, à la base de l'un des deux montants, une « fenêtre » rectangulaire de dimensions convenables. La réalisation est évidente.

Ainsi le fil horizontal peut passer et lorsqu'on utilise cette extrémité comme source, la main de l'expérimentateur évolue plus aisément.

En conclusion, rappelons l'adresse de l'établissement qui commercialise les bobines de rail :

SEFARD, Route de Thiron,
28400 Nogent-le-Rotrou.

Modèles proposés : B₁ Ø = 90 mm ; largeur du fil \simeq 4 mm,

B₂ Ø = 80 mm ; largeur du fil \simeq 2 mm.

Prix (toutes taxes, franco de port et d'emballage) : 150 F chaque modèle.

C. GUILLON,

(Lycée Rémi-Belleau - Nogent-le-Rotrou).
