

Une introduction à la dynamique

Nous présentons ici une série d'expériences de mouvements obtenus avec des mobiles sur coussin d'air, et leur utilisation. Cette présentation sert de support à notre enseignement de mécanique au début de la première année de Faculté (D.E.U.G. A - 1^{re} année - Physique intégrée - Faculté des Sciences de Besançon). Cette présentation est actuellement nécessaire en Faculté, beaucoup d'étudiants ne voyant dans la mécanique qu'un recueil de formules. Elle nous semble utilisable pour les enseignants du secondaire dans le cadre des nouveaux programmes de physique sinon directement du moins comme un exemple de travail possible (elle peut apparaître comme une application déjà expérimentée des programmes et des commentaires déjà publiés dans le B.U.P. n° 594 ; elle rejoint une démarche théorique proposée par K.-M. BECKER, BILWES et WEILL dans un encart pédagogique de la S.F.P. en 1974).

L'exploitation honnête (systématique et en laissant le moins possible de points obscurs) des résultats obtenus à l'aide des mobiles sans frottements permet de mettre en évidence :

- la difficulté d'interprétation du mouvement des solides,
- l'idée de point matériel,
- la possibilité d'existence de lois simples sur la mécanique du point matériel.

Cette série d'expériences n'apparaît pas comme la vérification expérimentale (qui serait non concluante) d'une loi apparue *ex nihilo*, mais comme un exemple de démarche de physicien, simplifiant le plus possible les phénomènes étudiés pour entrevoir les possibilités de lois simples dont l'utilisation systématique permettra d'interpréter des phénomènes plus compliqués (la mécanique du solide). Elle peut apparaître comme la négation d'une idée un peu vieillotte de l'expérience de cours, simple béquille du discours théorique (et assimilable en cela à certains gadgets audiovisuels). Elle nous semble caractéristique de notre esprit de physiciens, en nous démarquant d'un enseignement où nous apparaîtrions (apparaissions) comme les parents pauvres des mathématiciens : nous voulons faire des théories mathématiques, mais ce sont des mathématiques impures. Il nous semble que cela correspond à une démarche souhaitée par la Commission Lagarrigue.

Les différents documents sont obtenus par photographie des traces, laissées sur une feuille au carbone par des décharges électriques régulièrement espacées ($\Delta t = 20, 40$ ou 60 ms) à l'aide d'un stylet électrique lié à des mobiles se déplaçant sur coussin d'air sur une table plane. Dans un des documents, la table est inclinée (5), dans tous les autres, elle est horizontale. Les résultats correspondent à des conditions expérimentales différentes.

Document 1. Le mobile est envoyé sur un obstacle lourd. Le choc a lieu par l'intermédiaire de ressorts.

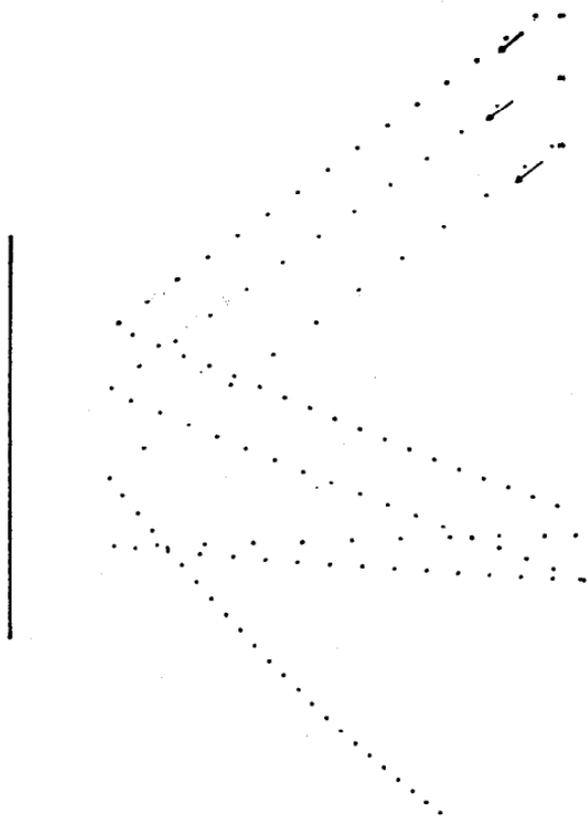


Fig. 1

Documents 2, 3, 4. Deux mobiles semblables (2) ou différents (3, 4) se heurtent avec des conditions initiales différentes. Dans les documents 2 et 3, le choc a lieu par l'intermédiaire de ressorts, dans le document 4, avec réunion (une sorte de velcro assure l'arrimage des mobiles). Le document 5 montre les mouvements de deux mobiles liés rigidement. Le document 6 montre le mouvement du mobile, un deuxième stylet étant fixé sur la périphérie

du mobile. Les documents 8, 9 et 10 mettent en évidence des chocs sans contact : le mobile s'approche plus ou moins d'un autre fixé (10) avec une force de répulsion magnétique ; dans les documents 8 et 9, les deux solides sont mobiles.

Le document 7 montre deux mouvements sur le plan incliné.

Nous nous sommes arrangés pour que l'on puisse repérer la simultanéité des éclairs (la mise en route et l'arrêt des décharges sont visibles sur les documents). Quoique non absolument nécessaires, les échelles d'espace et de temps peuvent être indiquées. Nous proposons l'étude des résultats obtenus suivant la progression suivante.

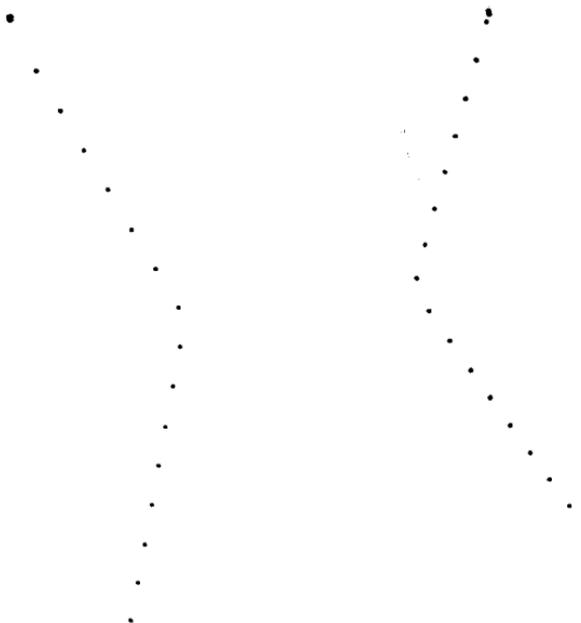


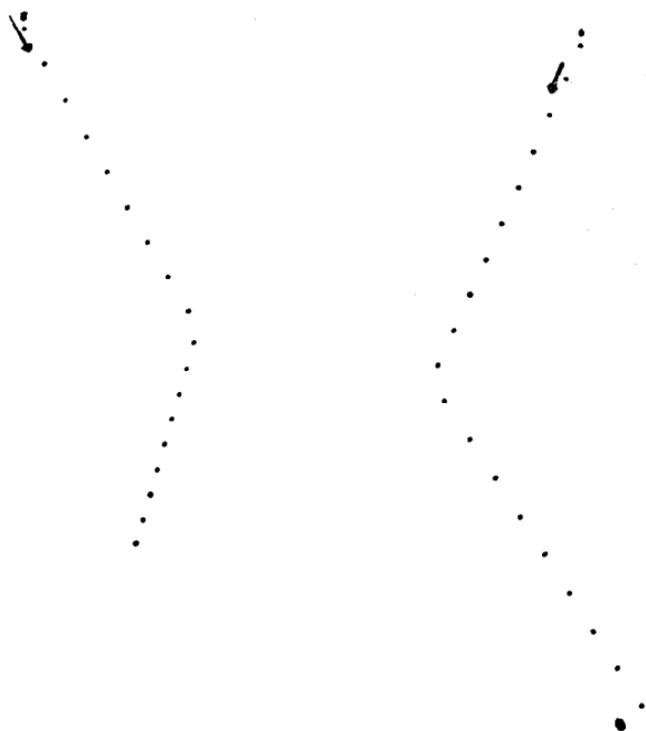
Fig. 2. — $M_1 = M_2$.

I. DOCUMENTS N° 1, 2, 3, 4.

1) Etude des portions rectilignes.

L'étude de ces portions rectilignes permet de préciser la notion de vecteur déplacement, la notion de vitesse moyenne entre deux éclairs. Les mesures correspondantes mettent en évidence une constance dans le mouvement (vitesse uniforme). Il faut insister sur la partie inductive : rien ne détermine *a priori* sur le document la trajectoire du mobile entre les éclairs (on pourrait avoir) :



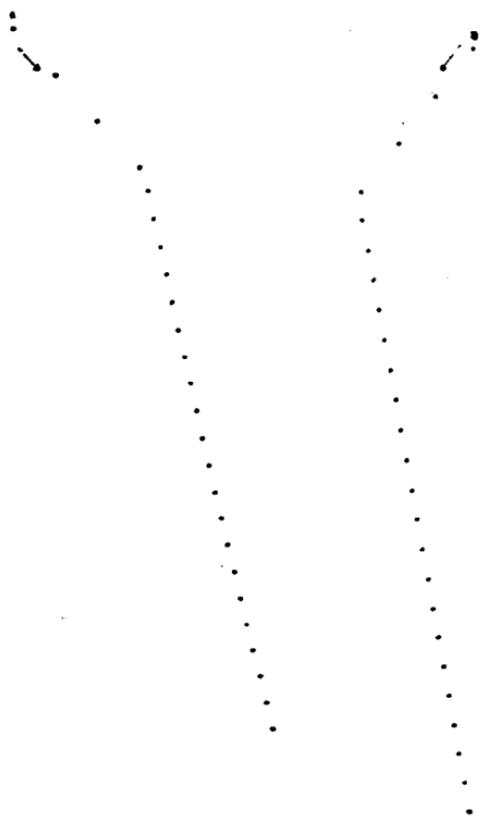
Fig. 3. — $M_1 \neq M_2$.

ni la constance de la vitesse entre les éclairs. La vérification de cette induction par d'autres expériences serait nécessaire. (Cela peut permettre de détendre les élèves. Il n'y a pas de questions stupides et aucune suggestion — si farfelue soit-elle *a posteriori* — n'est à écarter *a priori*. Le *a posteriori* de l'étudiant n'est pas celui de l'enseignant).

Le problème de la représentation de cette vitesse soulève deux difficultés : qu'est-ce que le vecteur déplacement ? Qu'est-ce que le vecteur vitesse moyenne ? D'où la définition du vecteur vitesse instantanée comme un vecteur lié (sans gros problème ici étant donné l'uniformité du mouvement *) (le vecteur lié, souvent représenté par un vecteur d'origine, le point considéré, est l'élément de base d'un champ de vecteur).

La deuxième difficulté est dans la représentation : mathématiquement, cela correspond au fait que la notion de champ de

(*) Cette difficulté apparaîtra dans l'étude du mouvement non rectiligne (doc. 5).

Fig. 4. — $M_1 \neq M_2$.

vecteurs vitesses, bien que représentée dans l'espace géométrique, n'a pas la même nature que cet espace géométrique. Si on représente le vecteur vitesse sur le graphique, il faut bien voir que cette représentation est arbitraire : la longueur du vecteur vitesse correspond à un choix d'échelle arbitraire.

Cette difficulté conduit à envisager (si cela n'a pas déjà été soulevé par les élèves) le problème de la représentation. Le travail sur la feuille, avec la mise en évidence des vecteurs déplacements est déjà un travail symbolique : les vecteurs déplacements sur la photo ne sont pas les vecteurs déplacements réels. Cependant, on a sur la feuille une représentation de l'espace, dans des conditions telles que tout le travail effectué sur le papier pourra être mis en correspondance avec un travail effectué directement sur la trace laissée sur le papier au carbone, donc avec le mouvement réel. Pour l'essentiel, ce travail est un travail

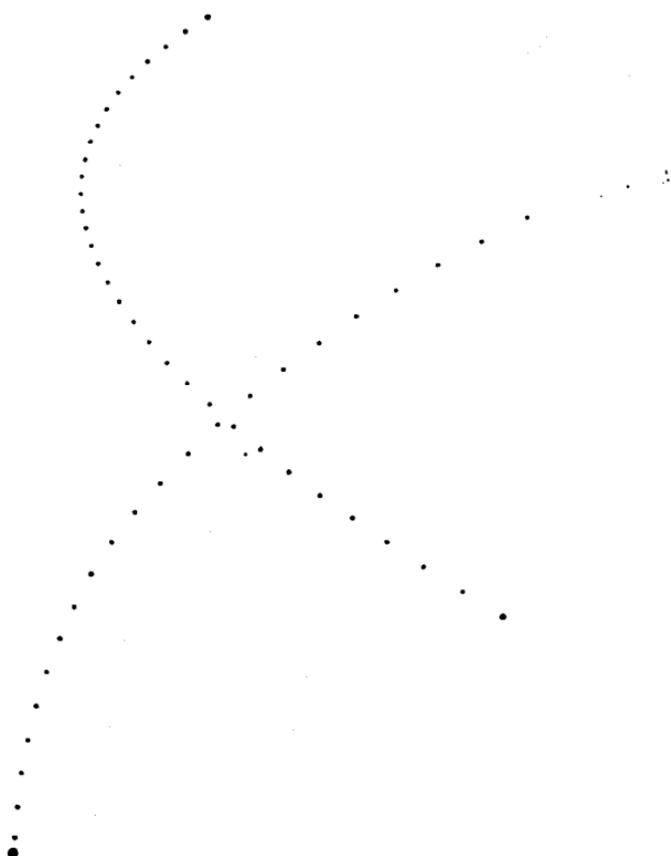


Fig. 5

intrinsèque et n'a pas besoin de déterminations numériques pour être utilisable au moins partiellement (il n'est pas nécessaire de projeter sur deux axes gradués *p. e.*).

La représentation symbolique des vecteurs vitesses, si elle s'appuie sur la même structure mathématique (vecteurs) correspond à une autre série de vecteurs et en particulier la longueur absolue des vecteurs vitesses est arbitraire. L'arbitraire correspond à un choix d'échelle indépendant de celui de l'échelle des vecteurs déplacement.

Au cours de ce premier travail peut fort bien intervenir une étude critique des mesures effectuées : constance de la vitesse avec quelle précision - dispersion des mesures, détermination expérimentale à l'aide de points rapprochés ou éloignés...



Fig. 6

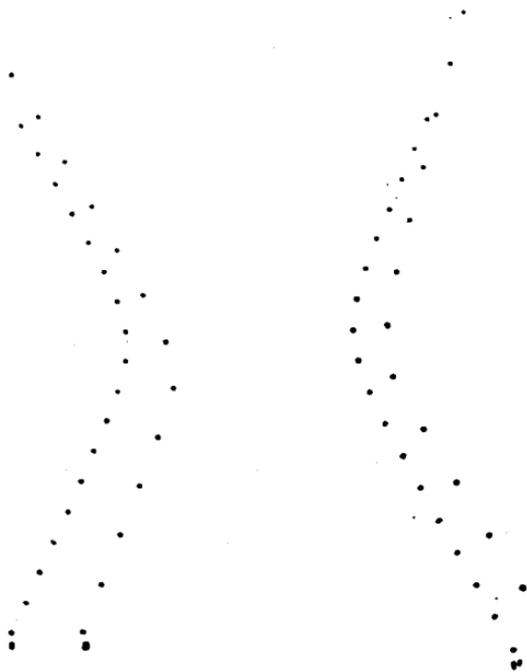


Fig. 7

Les résultats déjà obtenus sur cette étude qui pourrait sembler comme triviale permettent d'aller plus loin dans l'étude des mouvements. Ils permettent d'introduire la suite.

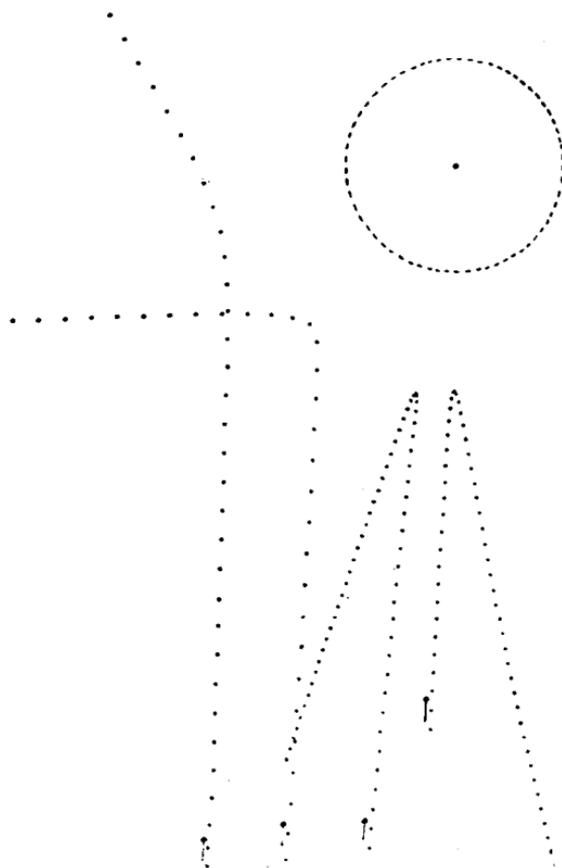


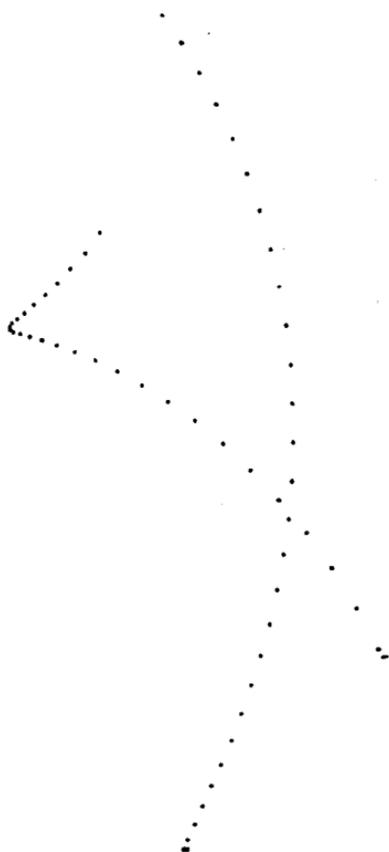
Fig. 8

2) Comparaison des vecteurs vitesses avant et après les chocs (les interactions).

La seconde partie de l'étude des quatre documents consiste en la comparaison des vitesses avant et après le choc.

Déjà dans le document 1, on voit que cette étude consistera en une comparaison du module et de la direction. Cela suggèrera de concentrer ces deux études en travaillant sur les vecteurs eux-mêmes et non sur les projections ou les modules et les directions.

L'étude systématique du document 1 peut être menée : cela ne nous semble pas être la meilleure méthode. On y retrouverait des lois de réflexion avec cependant une diminution du module

Fig. 9. — $M_1 \neq M_2$.

de la vitesse non explicable *a priori* (cela pourra être fait plus loin).

L'étude du document 3 (masses égales) amène à soupçonner des modifications symétriques des vecteurs vitesses. L'étude des documents 4 et 5 ($m_1 = 650$ g $m_2 = 1000$ g) remet en question cette induction et on pourra amener les élèves à comparer les quantités \overrightarrow{mv} .

Cette étude amène donc à induire dans ces interactions, une modification symétrique des vecteurs \vec{p} donc aussi l'intérêt de \vec{p} (vecteur quantité de mouvement).

La difficulté mathématique de composition de vecteurs liés n'apparaît pas vraiment : le choc apparaît comme instantané et la composition à la limite se conçoit bien.

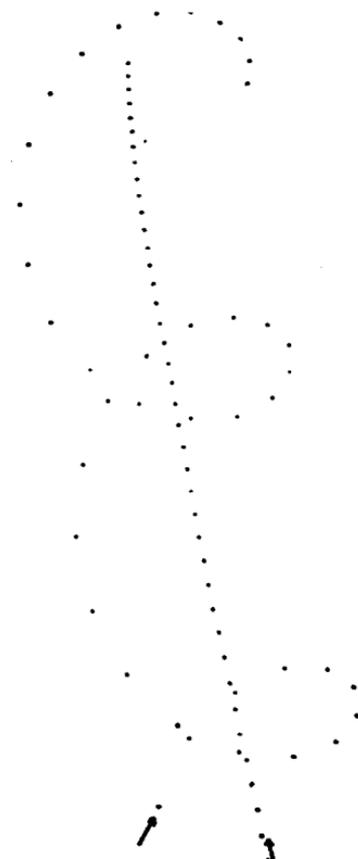


Fig. 10

3) Notion de centre de masse (2, 3, 4).

On peut proposer aux élèves l'étude systématique du mouvement du milieu du segment liant à un instant donné les deux masses. Cette étude permet d'induire un mouvement rectiligne uniforme (doc. 2). Par contre, en 3 et 4, on est amené naturellement à considérer le mouvement du barycentre avec comme coefficients les masses.

Le mouvement du centre de masse rectiligne uniforme avec ou sans interaction nous permet de justifier ce qui a été admis sans discussion depuis le début de l'étude : mouvement des solides déterminé par le mouvement du centre de symétrie.

On peut alors se servir des documents 5 et 6 pour voir qu'il peut y avoir d'autres problèmes dans le cas du solide : ceux liés à la rotation. Cela permet de prendre en compte certaines différences entre les expériences réalisées (*) et les inductions introduites sur le mouvement du point matériel : les écarts apparaissent comme l'introduction de phénomènes d'autre nature ne remettant pas en cause la validité de la théorie (conservation de \vec{p}) prise comme hypothèse (induite). La théorie du point matériel laisse tomber des aspects de l'expérience (rotation du solide) qu'elle permettra de prendre en compte dans un stade ultérieur.

L'ensemble du centre de masse et de la quantité de mouvement permet de définir la quantité de mouvement d'un ensemble de points matériels (d'un solide) comme grandeur vectorielle attachée au centre d'inertie.

II. DOCUMENT N° 5 - INTRODUCTION DYNAMIQUE DE LA FORCE.

Maintenant qu'est bien vu ce qui change dans les chocs précédents (quantité de mouvement du centre d'inertie), l'étude des mouvements sur ce document met en évidence une variation continue de la quantité de mouvement. En inclinant la table, nous avons modifié quelque chose : le mouvement n'est plus rectiligne uniforme.

Le contenu conceptuel de l'étude de ces mouvements a été complètement décrit en I. Les difficultés apparaissent du fait qu'on n'a plus un mouvement rectiligne et uniforme. La définition du vecteur vitesse moyenne entre deux instants matérialisés sur le graphique ne pose pas de problème : il suffit d'imaginer le mouvement uniforme entre les deux points.

Cette image n'est pas satisfaisante, il est évident à tous que la trajectoire est continue. Il faut donc introduire la vitesse comme limite quand les intervalles de temps tendent vers zéro (les propriétés mathématiques prouvant l'existence d'une telle limite ne nous semblent pas nécessaires ici — le bon sens physique ou même simplement géométrique suffisant).

On arrive donc au champ de vecteurs constitué par le point matériel aux différents instants et son vecteur vitesse associé.

(*) Dans l'étude du document 1, on peut expliquer la non conservation du module de P par la rotation — d'autant plus marquée que le choc est oblique. On ne peut interpréter le mouvement non-rectiligne ainsi : limites de conditions d'expérience (en tournant, le mobile se déséquilibre et on n'est plus dans le cas d'absence de frottements).

L'existence de ce champ de vecteurs où les vecteurs vitesse varient amène à recommencer l'opération effectuée sur les vecteurs déplacements pour tenir compte de la modification. On est donc amené ici à parler de l'hodographe et de l'accélération sur un mode strictement issu de l'étude précédente. (Accélération issue de l'accroissement vectoriel des vitesses).

Pour revenir au document, on peut montrer comment une connaissance discontinue des positions du point matériel permet d'approcher l'accélération.

La vitesse moyenne entre t_{n-1} et t_n peut, en première approximation, être attachée au point matériel au temps $\frac{1}{2}(t_{n-1} + t_n)$ (où sa position stricte est inconnue). Elle est équipollente à un vecteur proportionnel à $\overrightarrow{M_{n-1}M_n}$.

Il en est de même au temps $\frac{1}{2}(t_n + t_{n+1})$ où la vitesse serait équipollente à un vecteur proportionnel à $\overrightarrow{M_nM_{n+1}}$ avec la même constante de proportionnalité. L'accroissement du vecteur vitesse entre ces deux instants apparaîtra comme caractérisé par le vecteur différence, obtenu par la règle du parallélogramme.

(Pour que les étudiants voient s'ils ont assimilé, nous leur proposons de l'appliquer ensuite sur un mouvement rectiligne accéléré : traiter le mouvement rectiligne en premier n'apporte pas d'avantage notable : le raisonnement sur une coordonnée cache l'aspect vectoriel).

L'éclaircissement des constantes de proportionnalités constitue le pas suivant et permet de montrer comment on approche une détermination du vecteur accélération.

L'étude systématique du document met en évidence que les vecteurs accélérations déterminés approximativement apparaissent comme équipollents.

Cela nous amène à induire que le résultat de l'inclinaison du plan a des effets équivalents en tous points (ce qui demanderait d'autres expériences pour être vérifié) et à caractériser cette action à partir de la variation de vitesse. Nous sommes amenés à rapprocher la modification de la quantité de mouvement à des actions qui peuvent être étudiées en statique en tous les points du plan et à évaluer (non à identifier) en tout point et à tout ins-

tant le vecteur force et le vecteur $\frac{d\vec{p}}{dt}$. Cette relation obtenue

expérimentalement ici et élevée au rang de principe (loi de NEWTON).

Pour étudier les conséquences de cette définition, nous sommes amenés à étudier d'autres expériences où la pesanteur sociologique n'intervienne pas.

III. ETUDE DES DOCUMENTS N° 8, 9, 10 - ACTION ET REACTION.

L'étude du mouvement du document 10 est strictement calquée sur celui du document précédent : il permet de mettre en évidence des caractéristiques de la forme (magnétique) (et de s'assurer que les constructions précédentes sont bien comprises).

L'étude des documents 8 et 9 permet de mettre en évidence expérimentalement l'égalité (au sens près) des interactions.

Cette découverte expérimentale, on expliquera qu'elle est élevée au rang de principe (troisième loi de NEWTON). On insistera sur le fait qu'elle est vraie pour les forces de contact comme pour les forces à distance (en statique comme en dynamique).

On pourra montrer que la trajectoire rectiligne du centre d'inertie et la conservation de la quantité de mouvement totale peut être déduite — dans le cas de deux points matériels en interaction et soumis à aucune force extérieure — de la loi fondamentale et de la loi d'action et de réaction.

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = 0 \quad \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{C}^{te}$$

$$m_1 \frac{d\vec{OM}_1}{dt} + m_2 \frac{d\vec{OM}_2}{dt} = \vec{C}^{te}$$

Si on prend G tel que $m_1 \vec{GM}_1 + m_2 \vec{GM}_2 = 0$ — barycentre des deux masses — on obtient $(m_1 + m_2) \frac{d\vec{OG}}{dt} = \vec{C}^{te}$.

IV. ETUDES ENERGETIQUES.

Ces études pourraient être omises : la somme de renseignements obtenus est déjà riche.

Cela serait une grave faute physique : cette dernière partie est sans doute aussi importante pour la physique que les lois de NEWTON induites précédemment.

On peut reprendre systématiquement toutes les mesures et voir ce qu'il en est de la conservation de l'énergie.

Le document 1 permet de penser à une conservation de l'énergie cinétique de translation — qui serait valable pour le point matériel et dont les expériences s'écarteraient plus ou moins à cause de la rotation.

Les documents 2 et 3 vérifient à peu près cette conservation (même remarque) mais 4 montre de façon évidente une non conservation.

Les expériences 8, 9 et 10 mettent en évidence, même sans contact, une non conservation avant et après le « choc » de l'énergie cinétique.

On peut reprendre la loi fondamentale avec le principe d'action et de réaction :

$$\vec{F}_{12} = \frac{d\vec{p}_2}{dt} \qquad \vec{F}_{21} = \frac{d\vec{p}_1}{dt}$$

$$\vec{F}_{12} d\vec{M}_2 = m_2 d\vec{M}_2 \frac{d\vec{V}_2}{dt} \qquad \vec{F}_{21} d\vec{M}_1 = m_1 d\vec{M}_1 \frac{d\vec{V}_1}{dt}$$

ce qui conduit à :

$$\vec{F}_{12} d\vec{M}_2 = \frac{1}{2} m_2 dV_2^2 \qquad \vec{F}_{21} d\vec{M}_1 = \frac{1}{2} m_1 dV_1^2$$

Le travail des forces d'interaction se traduit par une variation des énergies cinétiques de deux masses.

Un choc élastique est, par définition, un choc où les forces d'interaction ne travaillent pas — où l'énergie cinétique totale reste constante.

Dans les « chocs » magnétiques, si on admettait que les forces dérivent d'un potentiel, il y aurait conservation de l'énergie cinétique entre le moment initial et le moment final : ce n'est pas le cas.

Dans les conditions d'expérience, les forces magnétiques ne dérivent pas d'un potentiel : le mouvement correspond à la création de courants induits, et, il y a interaction avec ces courants induits : les forces ne sont pas celles qui seraient déterminées en statique et qui dérivent d'un potentiel.

Et on peut expérimentalement voir que la disparition d'énergie cinétique correspond au travail de ces forces magnétiques se traduisant finalement par un échauffement par courant de FOUCAULT.

Remarque.

L'exploitation présentée ici correspond à quelque douze heures de travail des étudiants et à un cours de synthèse de une heure.

- L'utilisation des mesures effectuées ici (variantes améliorées de la chronocinématographie) peut se voir complétée ou remplacée par d'autres mesures. Nous avons longtemps utilisé les données tirées des livres PSSC la Physique (photo stroboscopée d'une bille).
- D'autres expériences, à l'aide de billes et de papier carbone, donnent des résultats sur les trajectoires dans des chocs qui — bien que moins riches d'informations — sont utilisables dans cet esprit.

Pour réaliser les enregistrements des fig. 1 à 10, nous avons utilisé l'ensemble : « Mécanique à deux degrés de Libertés » sur coussin d'air, fabriqué par une maison française. Les mobiles sont des autoporteurs et l'enregistrement se fait par étincelles sur du papier spécial de dimensions 65×45 cm. Les documents ainsi obtenus peuvent être utilisés directement dans le cadre des travaux pratiques. Mais l'enregistrement sur format commercial $21 \times 29,7$ cm constitue un outil de travail de cours ou de travaux dirigés, plus pratique pour l'étudiant.

Pour cela, l'enseignant prépare à l'avance les documents relatifs aux sujets traités. On peut procéder ainsi : en photographie, l'enregistrement direct en utilisant un Microfilm Kodak. En le surexposant (de 1,5 à 2 fois le temps normal), on obtient un négatif bien contrasté. Ensuite, on tire un positif sur du papier dur ($24 \times 30,5$ cm) en choisissant l'échelle (de $1/1,5$ à $1/2$) par rapport à l'enregistrement direct. A partir de ce positif (sur lequel on ajuste à la machine les masses du mobile, temps d'étincelage...), on fait un stencil électronique.

L'enseignant peut ainsi mettre à la disposition de tous les étudiants le même document. De plus, il se constitue une collection d'enregistrements sur des sujets divers pour plusieurs années. Il peut donc faire des démonstrations devant les étudiants en produisant un enregistrement direct, et distribuer ensuite les documents correspondants.

— Le matériel employé (table rectifiée, mobiles soufflants alimentés par des piles rechargeables) coûte environ 4 500 F. Si son achat peut sembler hors de portée d'un établissement, il pourrait sans doute être assumé par un groupement d'établissements ; à l'aide des processus modernes de reproduction, il est aisé de constituer une bibliothèque de feuilles utilisables par les

élèves après qu'une présentation ait permis de leur montrer le mode d'obtention des feuilles sur lesquelles ils travailleront.

Pour l'académie de Besançon, nous sommes prêts à accueillir les enseignants (même avec les élèves) et fournir des résultats de mesures exploitables par l'ensemble des élèves pour appuyer une démarche pédagogique.

Ce travail correspond aux résultats d'un travail d'équipe effectué en physique intégrée en collaboration avec MM. RUEFF, GUICHON et GARBAGNATI en particulier, et grâce aux discussions menées avec M. PLUVINAGE.

C.-A. RISSET, J. OBERT,

Groupe pédagogique

(Faculté des Sciences de Besançon).
