

tournant autour de son axe, tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre. Là encore les oscillations sont de même durée si elles ont la même amplitude; mais, aussi, l'amplitude irait peu à peu en diminuant si l'action du rouage moteur ne venait, à chaque oscillation, donner une petite impulsion qui perpétue le mouvement dans les mêmes conditions.

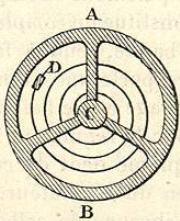


Fig. 7.

Ici aussi, comme dans le pendule, il y a isochronisme des oscillations tant que les variations sont faibles; ici aussi, en modifiant progressivement la longueur ou la tension du ressort spiral, on fait varier insensiblement la durée des oscillations. On peut donc régler cette durée de manière que le balancier effectue 86 400 oscillations en un jour.

Dans le pendule et dans le balancier les variations de température auraient pour effet de changer la durée des oscillations; mais, par diverses dispositions, on peut s'opposer à ces changements.

L'aiguille dont nous avons parlé avance d'une division à chaque seconde : le cadran sur lequel elle se meut est divisé en 60 parties, elle effectue donc un tour en une minute. On sait que, pour pouvoir évaluer des temps supérieurs à une minute, le compteur comporte deux autres aiguilles dont l'une tournant 60 fois plus lentement fait un tour en une heure et dont l'autre fait un tour en douze heures. Ces deux aiguilles existent même toujours, tandis que la première est supprimée dans les appareils qui ne servent pas à évaluer le temps avec précision.

Dans les montres destinées à faire des estimations exactes, on trouve souvent une disposition commode : l'aiguille des secondes est normalement au 0 des divisions; pour évaluer la durée d'un phénomène, on met cette aiguille en mouvement, en pressant sur un bouton, au moment où le phénomène commence; en pressant une seconde fois à la fin du phénomène l'aiguille s'arrête et on peut lire commodément la durée par la position fixe qu'a prise l'aiguille. Celle-ci revient immédiatement au zéro en poussant une troisième fois sur le bouton : le compteur est alors prêt pour une autre expérience.

Lorsqu'il s'agit d'évaluer des espaces de très courte durée on utilise les vibrations isochrones exécutées par les verges élastiques, par les diapasons notamment. En parlant de ceux-ci (voir ACOUSTIQUE), nous dirons quelles dispositions il convient d'adopter.

CHAPITRE II

NOTIONS DE MÉCANIQUE

La connaissance de la mécanique est indispensable pour l'étude des phénomènes physiques et des appareils utilisés pour observer et mesurer ceux-ci; elle est nécessaire également en physiologie à plus d'un titre. Aussi nous croyons utile de résumer, aussi rapidement que possible d'ailleurs, les données mécaniques dont nous aurons à faire usage ultérieurement : nous ne donnerons aucune démonstration, renvoyant pour une étude complète aux traités spéciaux et nous nous bornerons à donner les définitions et les énoncés, insistant seulement quelque peu sur les idées générales les plus importantes.

Nous nous occuperons successivement de :

La *cinématique*, étude du mouvement considéré indépendamment de ses causes;

La *dynamique*, étude du mouvement considéré dans ses rapports avec ses causes, les forces.

Nous ferons entrer dans le même chapitre le rappel des notions relatives à la *pesanteur*, les questions qui s'y rattachent nous paraissant réellement d'ordre mécanique.

ART. I. — CINÉMATIQUE

XIX. — La cinématique comprend l'étude du mouvement considéré indépendamment de ses causes; son étude repose sur les mesures de longueur et de temps seulement.

Bien que, en réalité, nous observions seulement des *corps* en mouvement, nous occuperons d'abord de l'étude du mouvement d'un *point*. Nous considérerons un corps comme formé par la réunion de points matériels, et le mouvement du corps sera déterminé quand nous connaîtrons le mouvement de chacun des points qui le composent.

Un corps est dit un *solide invariable* lorsque les distances des différents points qui le composent ne changent pas, quelles que soient les actions subies par le corps. Il n'existe pas rigoureusement de solide invariable, mais il y a des corps tels que les distances des différents points entre eux varient de quantités assez petites pour être pratiquement négligeables : ce sont de tels corps que l'on considère comme des solides invariables.

XX. **Repos, mouvement d'un point, d'un corps.** — Un point M est en *repos* par rapport à un solide invariable lorsque ses distances à tous les points de celui-ci restent constantes.

Un point M est en mouvement par rapport à un solide invariable lorsque ses distances aux points de celui-ci varient en totalité ou en partie.

Un corps M est en repos par rapport à un solide invariable N lorsque tous les points qui le composent sont en repos par rapport à ce même solide N. Il est en mouvement par rapport à ce solide si cette condition n'est pas remplie pour tous ses points.

XXI. Trajectoire. — Lorsqu'un point M est observé successivement en deux points de l'espace, nous admettons, même lorsque nous n'avons pu le vérifier pour une cause quelconque, qu'il a occupé une série *continue* de positions intermédiaires. L'ensemble des positions successives ainsi occupées par le point considéré est une ligne qu'on appelle sa *trajectoire*. Cette ligne peut être droite ou courbe, et le mouvement est dit *rectiligne* ou *curviligne*. La connaissance de la trajectoire est seulement du domaine de la géométrie.

Mais, se plaçant à un autre point de vue, on peut considérer, aux divers instants, la distance du point M à un point O choisi arbitrairement et fixe sur la trajectoire. Cette distance est mesurée, non en ligne droite mais en suivant la trajectoire. Si cette distance est invariable le point M est en repos, si cette distance varie aux divers instants le point M est en mouvement.

La distance, à un instant donné, du point M au point O est ce qu'on appelle l'*espace*¹ et le point O est désigné sous le nom d'*origine des espaces*.

XXII. Loi, courbe du mouvement. — La relation qui existe entre les espaces et les temps correspondants s'appelle la *loi du mouvement*. Elle peut être caractérisée (III) par un énoncé, par une formule ou par une courbe.

La courbe est le seul mode de représentation qui puisse être appliqué dans la plupart des cas, notamment pour les mouvements étudiés en physiologie. Nous devons donc revenir sur ce que nous avons dit en général sur ce point, et indiquer comment on représente graphiquement la loi d'un mouvement.

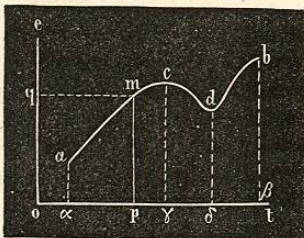


Fig. 8.

on porte sur l'axe *ot* (fig. 8) une longueur *op* représentant *t* à une échelle quelconque, mais déterminée à l'avance. Par le point *p* ainsi obtenu on porte parallèlement à l'axe vertical une longueur *pm* représentant *e* à une échelle également quelconque, mais déterminée. Le point *m* ainsi

1. En réalité l'espace est la distance du point mobile M à l'origine O, cette distance étant affectée d'un signe; le signe + est attribué conventionnellement aux distances comptées d'un certain côté de O, le signe - aux distances comptées de l'autre côté.

obtenu est le *point figuratif* de la position du point mobile M à l'instant considéré.

On opère de même pour chacun des instants où l'on a fait une observation, c'est-à-dire où l'on a mesuré les valeurs correspondantes de *t* et de *e*. En joignant alors les points obtenus par une courbe continue, conformément à ce que nous avons expliqué précédemment, on a en *ab* la *courbe représentative du mouvement* ou plus simplement la *courbe du mouvement*.

L'examen de cette courbe fournit des renseignements sur toutes les particularités du mouvement. C'est ainsi qu'on voit d'abord que celui-ci n'a pas commencé au moment où on commençait à compter les temps, puisque la courbe commence seulement en un point dont l'abscisse est *oa*. La valeur de cette abscisse, mesurée à l'échelle convenue, fait connaître l'instant où le mouvement a commencé; à ce moment le mobile était à une certaine distance de l'origine, distance dont la valeur serait connue en mesurant l'ordonnée *aa* à l'échelle adoptée. A partir de cet instant le mobile s'est éloigné de l'origine, puisque les ordonnées vont en croissant, et cet éloignement augmente jusqu'au temps représenté par *oy* pour lequel la distance à l'origine est mesurée par *yc*; le corps se rapproche alors de l'origine, puisque l'ordonnée diminue, jusqu'au temps représenté par *od*; à cet instant la distance est mesurée par *dd*. Puis le point s'éloigne de nouveau de l'origine puisque, de nouveau, l'ordonnée croît.

On analyserait d'une façon analogue toute courbe du mouvement.

Il peut arriver dans un mouvement que le point ne reste pas toujours d'un même côté de l'origine; dans ce cas, on convient de porter au-dessus de l'axe les valeurs des espaces qui correspondent à l'un des côtés de l'origine et de porter en dessous les espaces qui correspondent à des positions situées de l'autre côté¹.

Il est à peine nécessaire de faire remarquer qu'il n'y a aucune relation entre la courbe *représentative* du mouvement et la *trajectoire*.

XXIII. Détermination de la loi d'un mouvement. — La détermination de la loi d'un mouvement n'est que l'application de la méthode générale que nous avons indiquée ci-dessus.

Le mobile se mouvant sur une trajectoire connue, on note à différents instants l'heure, c'est-à-dire le temps écoulé depuis un instant déterminé, et les distances correspondantes, comptées, le long de la trajectoire, du point à l'origine des distances. Ces mesures ne peuvent être prises que lorsque le mouvement n'est pas trop rapide; dans le cas contraire, il faut avoir recours à des méthodes différentes dont nous indiquerons les principales.

Pour mesurer les distances, il est presque nécessaire que la trajectoire ait été préalablement divisée en parties de longueur connue, de manière qu'il suffise de faire une simple lecture à l'endroit où se trouve le mobile pour l'instant où on a noté le temps.

1. Cette convention est d'accord avec celle qui a été faite pour le signe des espaces et avec celle adoptée pour la représentation graphique des équations.

On a ainsi des couples de valeurs du temps et de l'espace $t_1 e_1, t_2 e_2, \dots, t_n e_n$ qui se correspondent et dont on se sert, comme nous l'avons indiqué (VII), pour tracer la courbe du mouvement.

Cette courbe sera d'autant mieux déterminée qu'on aura un plus grand nombre de points; elle serait tout à fait exacte si l'on pouvait avoir un point à chaque instant, ce que ne peut obtenir un observateur, mais ce que l'on peut avoir par le tracé automatique de la courbe.

Ce procédé est d'ailleurs le seul que l'on puisse employer dans des mouvements rapides, de courte durée, comme c'est le cas de presque tous les mouvements étudiés en physiologie.

Nous indiquerons plus tard successivement les principales méthodes qui sont employées pour obtenir automatiquement la courbe d'un mouvement.

XXIV. Mouvement uniforme, vitesse. — Les lois des mouvements peuvent être variées à l'infini et il serait sans intérêt d'indiquer ici sur quelles idées on peut se baser pour les classer; mais il en est un petit nombre qu'il est indispensable d'étudier avec quelques détails, soit parce qu'ils se rencontrent très fréquemment dans les phénomènes observés ou dans les appareils employés, soit parce que leur étude conduit à des notions dont la connaissance est indispensable pour préciser quelques idées que nous aurons à développer.

Le mouvement le plus simple que l'on puisse concevoir est celui dans lequel les espaces parcourus sont proportionnels aux temps : il est appelé *mouvement uniforme*.

De cette définition on conclut que :

Dans un mouvement uniforme, les espaces parcourus dans des temps égaux sont égaux.

On en déduit également que :

Le quotient d'un espace par le temps employé à le parcourir est constant pour un mouvement déterminé.

Ce quotient constant est caractéristique de chaque mouvement uniforme; on l'appelle la *vitesse* de ce mouvement. D'après la définition même on voit que la vitesse est numériquement égale à l'espace parcouru dans l'unité de temps.

Il y a une unité de vitesse dans le système absolu; c'est la vitesse d'un mouvement uniforme dans lequel l'unité de longueur est parcourue dans l'unité de temps. On n'a malheureusement pas donné de nom particulier à l'unité de vitesse, de telle sorte que pour définir une vitesse il faut indiquer les unités de longueur et de temps dont on a fait usage. Ainsi, on dira qu'un train de chemin de fer a une vitesse de 50 kilomètres à l'heure; que la lumière se propage avec une vitesse de 300 000 kilomètres par seconde; que les excitations nerveuses se propagent avec une vitesse (approximative) de 30 mètres par seconde, etc.

On reconnaît aisément que la courbe représentative d'un mouvement uniforme est une ligne droite, et que, réciproquement, tout mouvement dont la courbe représentative est une ligne droite est uniforme. La vitesse du mouvement est déterminée par l'inclinaison de la droite.

XXV. Mouvement varié. — Tout mouvement qui n'est pas uniforme est varié : la courbe qui le représente est alors une ligne courbe.

On peut considérer une ligne courbe comme formée par la réunion d'éléments rectilignes infiniment petits. Chacun des éléments rectilignes représente un mouvement uniforme. On voit donc qu'on peut regarder un mouvement varié comme formé par la succession de mouvements uniformes de durées infiniment petites.

Pour chacun de ces mouvements uniformes élémentaires, on peut déterminer la vitesse (XXIV); cette quantité est appelée la vitesse du mouvement varié à l'instant considéré. Cette vitesse varie d'un instant à l'autre, comme la direction des divers éléments de la courbe.

XXVI. Mouvements uniformément variés. Accélération. — Parmi les mouvements variés, le plus simple est celui dans lequel les variations de la vitesse sont proportionnelles au temps. Il est dit mouvement uniformément varié.

De cette définition, on déduit, notamment, que :

Le quotient d'une variation de vitesse par le temps correspondant est constant pour un mouvement déterminé.

Ce quotient, qui caractérise chaque mouvement uniformément varié, est appelé son *accélération*.

L'unité d'accélération est l'accélération d'un mouvement uniformément varié dans lequel la vitesse s'accroît d'une unité (de vitesse) pendant l'unité de temps. Elle n'a pas reçu de nom particulier.

On reconnaît assez aisément que la courbe représentative d'un semblable mouvement est une parabole dont l'axe est parallèle à l'axe des espaces, et réciproquement.

XXVII. — De même que nous avons regardé un mouvement quelconque comme formé par la succession de mouvements uniformes de très courte durée, on peut également le considérer comme formé par la succession de mouvements uniformément variés de durée infiniment petite; ces mouvements élémentaires diffèrent les uns des autres par leur accélération. L'accélération du mouvement uniformément varié élémentaire qui, à un instant donné, peut être substitué au mouvement réel, est appelée l'accélération de ce mouvement à l'instant considéré.

L'accélération d'un mouvement varié quelconque est donc une quantité variable.

XXVIII. Mouvements périodiques. — Parmi tous les mouvements variés il est utile de citer particulièrement le *mouvement périodique*.

On désigne sous ce nom tout mouvement qui est astreint à repasser périodiquement par un même point fixe : tel est le mouvement d'une balle élastique qui rebondit, du pendule d'une horloge, etc.

Il est facile de se rendre compte que la courbe représentative d'un semblable mouvement est une ligne sinuëuse, autour de l'axe des abscisses (fig. 9, 10) ou d'une parallèle à cette ligne.

Le mouvement est dit *périodiquement uniforme* lorsque les instants auxquels le mobile revient au point fixe sont séparés par des temps d'égale durée, quelle que soit d'ailleurs la nature du mouvement entre ces instants. Ce mouvement se rencontre dans les oscillations des corps élastiques, dans les pulsations normales du pouls, etc. (fig. 9).

Dans ces mouvements, la *durée* de la période est le temps qui sépare deux passages consécutifs du mobile au même point et dans le même sens (en général le mobile passe en chaque point alternativement dans un sens et dans l'autre).

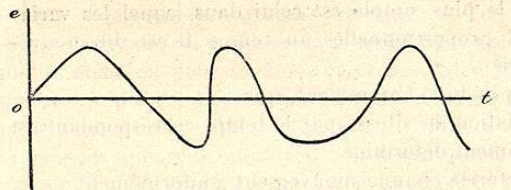


Fig. 9.



Fig. 10.

L'*amplitude* du mouvement est la distance, comptée sur la trajectoire qui sépare deux positions extrêmes consécutives du mobile.

XXIX. Mouvements d'un solide invariable. — D'une manière générale, le mouvement d'un corps est connu quand on a déterminé le mouvement de tous les points du corps. On démontre que lorsqu'il s'agit d'un solide invariable, il suffit de connaître le mouvement de trois points de ce solide.

Parmi tous les mouvements que peut prendre un solide invariable, il en est deux qui sont particulièrement simples, et importants à cause de leur fréquent emploi.

Dans le mouvement de *translation parallèle*, tous les points du corps décrivent au même instant des éléments de chemin, égaux, parallèles et de même sens (fig. 11). Ils ont donc tous la même vitesse au même instant. La trajectoire de chaque point peut d'ailleurs être quelconque, rectiligne ou curviligne.

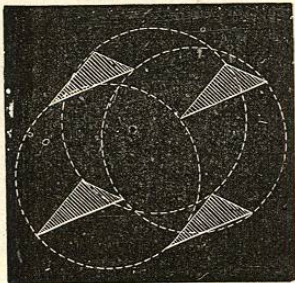


Fig. 11.

On dit aussi dans ce cas que le corps se déplace *parallèlement à lui-même*, parce que, en effet, une droite du corps conserve la même direction pendant toute la durée du mouvement.

Dans le mouvement de rotation autour d'un point fixe, le mouvement est tel que la distance de chacun des points du corps au point fixe O reste constante : chaque point reste donc sur une sur-

face sphérique ayant le point fixe pour centre, ou sur une circonférence si le mouvement a lieu dans un plan (fig. 12).

Enfin dans le mouvement de rotation autour d'un axe fixe, chaque point M du corps décrit une circonférence dont le plan est perpendiculaire à l'axe AB et dont le centre C est sur l'axe (fig. 13).

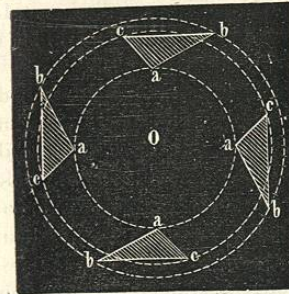


Fig. 12.

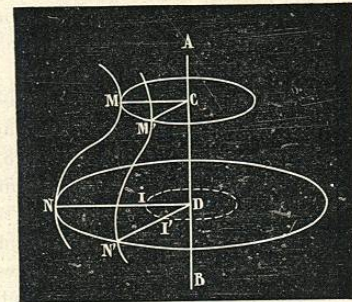


Fig. 13.

XXX. Enregistrement de la loi d'un mouvement. — La connaissance de certaines données que nous venons de définir nous permet de donner un exemple de modes d'enregistrement automatique d'un mouvement.

Supposons qu'il s'agisse d'enregistrer le mouvement d'un point se mouvant sur une ligne droite ab (fig. 14). Plaçons dans le voisinage un plan parallèle à cette

droite et se mouvant parallèlement à lui-même, dans son propre plan, d'un mouvement uniforme et perpendiculairement à la trajectoire du point. On adapte d'autre part au mobile un style susceptible de laisser une trace sur le plan.

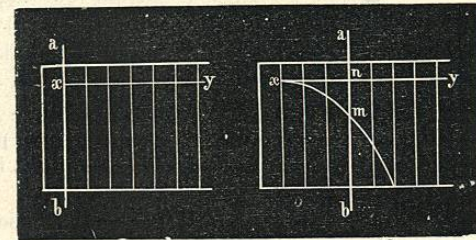


Fig. 14.

Si le plan est fixe et que le mobile se déplace, il laissera sur le plan une trace xb (I), par exemple, parallèle à la droite qu'il décrit. Si, au contraire, le mobile est maintenu fixe et que le plan se déplace, le style tracera une ligne xy perpendiculaire à la précédente. Mais si les deux mouvements ont lieu simultanément, le style tracera une ligne qui sera courbe en général (II) et qui sera la courbe du mouvement cherchée.

En effet, à un instant donné, depuis le commencement du mouvement, le plan se sera déplacé de manière que le point x qui au début était en coincidence avec la tige ab qui règle le mouvement du mobile s'en soit éloigné d'une quantité nx qui est proportionnelle au temps, puisque le mouvement du plan est uniforme, et qui, par conséquent, peut être prise pour caractériser le temps.

Mais, d'autre part, le mobile qui au début était en n sur la droite xy est parvenu en m , ayant parcouru l'espace nm ; ce point m qui appartient nécessairement à la courbe tracée est bien le *point représentatif* de la position du mobile, puisque son abscisse xn est proportionnelle au temps et son ordonnée nm est proportionnelle (égale même) à l'espace. La courbe tracée qui est l'ensemble de ces points représentatifs est bien la courbe du mouvement (XXII).

Cette disposition se trouve réalisée absolument dans un appareil de M. d'Arsonval destiné principalement à enregistrer la loi de mouvements de longue durée. Cet appareil (fig. 15) comprend une crémaillère verticale montée sur un pied pesant : une boîte rectangulaire dans laquelle existe un rouage d'horlogerie présente sur deux faces opposées des ouvertures par lesquelles on fait passer la crémaillère dont les dents se mettent en prise avec celles d'une roue dentée qui, par l'action du rouage d'horlogerie, est astreinte à tourner lentement et très régulièrement; la boîte dont le mouvement est réglé par celui de cette roue sur la crémaillère, descend aussi très lentement et uniformément : une de ses faces porte une plaque sur laquelle s'inscrit la courbe du mouvement d'un corps qui, se déplaçant horizontalement, porte un style qui appuie sur la plaque. Comme dans le cas précédent, la combinaison des deux mouvements produit le tracé d'une courbe qui est la courbe du mouvement cherchée.

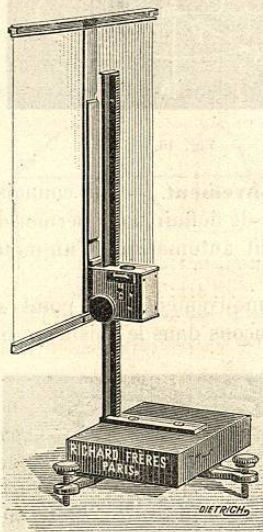


Fig. 15.

Il importe beaucoup que le style qui trace sur la courbe n'éprouve pas de la part de la plaque un frottement notable qui aurait pour effet de troubler le mouvement même et de donner une courbe inexacte. Pour éviter cela, le mieux est de prendre une plaque de verre ou de papier glacé recouverte de noir de fumée par son exposition au-dessus d'une flamme fuligineuse. Dans ce cas le style peut être formé d'une simple soie de sanglier.

On peut encore employer une feuille de papier glacé sur laquelle glisse une petite plume métallique de forme spéciale.

XXXI. — Lorsque, le mouvement étant rapide, la courbe doit être prolongée pendant assez longtemps, il faudrait donner à la plaque de trop grandes dimensions et, outre que l'appareil serait encombrant, il serait peu commode de lui communiquer un mouvement uniforme. On emploie alors un cylindre enregistreur qui tourne uniformément autour d'un axe parallèle au mouvement rectiligne considéré; on conçoit aisément que tout se passe alors comme si à chaque instant la surface était rem-

placée par son plan tangent, et que lorsque l'on aura déroulé la feuille de papier qui recouvre le cylindre, on aura exactement la même courbe que si cette feuille s'était déplacée parallèlement à elle-même dans son propre plan.

Le cylindre enregistreur étant maintenant d'un emploi constant dans les études physiologiques, il est nécessaire de le décrire avec quelques détails (fig. 16).

La partie importante est un rouage d'horlogerie monté dans une boîte

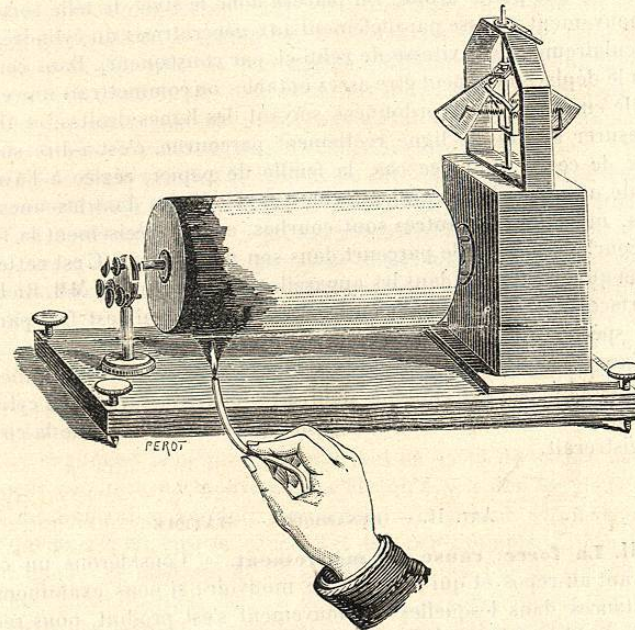


Fig. 16.

fixée à un pied massif. Grâce à l'emploi d'un régulateur à ailettes (régulateur Foucault, régulateur Yvon Villarceau), le mouvement de rotation peut être considéré comme absolument uniforme; sur un des côtés de la boîte apparaissent les extrémités de trois arbres qui, animés par des roues différentes, ont des vitesses de rotation différentes. En face, sur le même pied, s'élève un support qui porte, en face de ces trois axes, trois vis à pointe.

Le cylindre est métallique, creux pour être très léger; sur ses bases se trouvent des pièces par lesquelles on peut le fixer entre une vis à pointe et l'arbre de rotation correspondant; celui-ci lui communique alors la vitesse dont il est animé. Bien entendu, on a choisi l'axe dont la vitesse est celle qui sera la meilleure pour l'expérience que l'on veut réaliser.

On place sur le cylindre une feuille de papier glacé que l'on applique