

Zeitschrift: L'Enseignement Mathématique
Herausgeber: Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique
Band: 25 (1926)
Heft: 1: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

Artikel: L'ENSEIGNEMENT DE LA MÉCANIQUE ÉLÉMENTAIRE
Autor: Gagnebin, S.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-20690>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

L'ENSEIGNEMENT DE LA MÉCANIQUE ÉLÉMENTAIRE

PAR

S. GAGNEBIN (Neuchâtel).

Ce titre est celui d'un travail présenté aux sections de mathématiques et de sciences naturelles de la Société suisse des professeurs de Gymnase¹. Il ne correspond qu'imparfaitement au contenu de ces pages, car son but était, avant tout, de désigner l'objet d'une discussion où la question eut été élargie. Les thèses formulées doivent résumer les principaux points du rapport sur *L'Enseignement de la Mécanique dans les écoles moyennes* présenté l'année précédente par M. MEISSNER, professeur à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, rapport qui a été analysé dans cette Revue² et publié *in extenso* dans l'Annuaire de 1925 de ladite Société³. Il ne s'agit pas ici de discuter les thèses qui suivent, mais bien plutôt d'en illustrer l'application à l'enseignement élémentaire afin d'en faire comprendre la portée et d'en faciliter la discussion.

PREMIÈRE THÈSE: *La force ne doit pas être l'objet d'une définition générale; elle peut être introduite, comme le nombre en arithmétique, par des généralisations successives, à partir de la notion de poids.*

C'est en effet aux mathématiciens que M. Meissner emprunte ici sa méthode. Aucun manuel d'arithmétique ne commence par une définition du nombre en général. On suppose acquise la notion du nombre entier. On la précise en définissant les quatre

¹ Réunion tenue à Engelberg, les 3 et 4 octobre 1926.

² *L'Ens. math.*, XXIV^e an., N^{os} 4, 5, 6, p. 304-307.

³ *Vierundfünfzigstes Jahrbuch des Vereins Schweizerischer Gymnasiallehrer*. Versammlung in Baden, 1925; p. 101 à 121. — Verlag Sauerländer, Aarau.

opérations, on la généralise en introduisant successivement les nombres fractionnaires, relatifs et irrationnels. Pour exposer la notion de force, M. Meissner voudrait qu'on partît de la notion de poids. Il la préciserait en se servant de fils, de poulies et en rendant les élèves attentifs à l'existence des champs de forces; il la généraliserait en montrant que les forces statiques, dont il faut faire ici une énumération, peuvent être remplacées par des poids, fils et poulies. Il la généraliserait une seconde fois en introduisant la notion de vecteurs liés. La règle du parallélogramme s'introduirait alors tout naturellement.

On peut toujours recommencer, à ce propos, l'éternelle discussion de l'opportunité de placer l'étude du mouvement avant celle de l'équilibre et de définir conséquemment la force comme proportionnelle à l'accélération. On a donné pour défendre cette méthode de très bonnes raisons qu'il ne faut pas méconnaître.

Nous croyons inutile de revenir sur cette discussion, parce qu'il nous semble qu'on peut procéder des deux façons. Toutefois, il est nécessaire de mettre à cette liberté une condition: lorsqu'on a défini la force comme proportionnelle à l'accélération et qu'on passe, ensuite seulement, à la statique, on doit bien explicitement remarquer qu'en introduisant les forces de liaison, pression ou traction, on élargit considérablement la notion de force, à moins qu'on ne démontre que toutes les liaisons pourraient créer des accélérations.

Nous ne risquons en tout cas pas d'encourir des reproches à suivre le conseil de M. Meissner qui demande qu'on commence par l'étude de la statique, la presque totalité des expériences sur lesquelles repose la notion de force étant des expériences statiques.

DEUXIÈME THÈSE: Après avoir introduit les forces de réaction des solides, on peut traiter tous les problèmes de statique par un procédé unique d'isolement progressif et en écrivant que la résultante générale et le moment résultant sont nuls.

L'équilibre des solides est dû aux résistances de frottement et aux résistances à la déformation. La statique est la science des liaisons et celles-ci se manifestent comme des forces de réaction. Le principe newtonien de l'égalité de l'action et de la réaction

domine ainsi toute la statique. M. Meissner fait justement observer que l'application de ce principe est si instinctive que c'est une des difficultés de la dynamique de concevoir l'existence d'une force unique.

La notion, toute abstraite, de solide invariable permet de développer une statique purement géométrique.

Après avoir signalé les écueils qu'on peut rencontrer dans les définitions du poids spécifique, de la pression — qu'il en rapproche —, du centre de gravité, M. Meissner énonce une règle applicable à tous les problèmes de statique. Elle consiste à isoler progressivement de son milieu le corps dont on cherche les conditions d'équilibre en remplaçant, une à une, les actions qu'il subit par des forces appropriées. Il suffit alors d'écrire que le système des forces ainsi définies est en équilibre.

Par cette méthode, M. Meissner évite beaucoup de difficultés signalées en cours de route, il suggère surtout à l'élève l'idée d'une science qui dans sa simplicité, dans son unité, par une règle unique, permet une description précise et complète de la réalité étudiée.

Plutôt que de suivre l'auteur dans l'application de cette règle aux leviers, aux poutres, au plan incliné, au frottement, en reprenant des exemples gravés dans l'esprit de tous ceux qui ont entendu ou lu son rapport, nous nous laisserons entraîner au plaisir de montrer combien cette règle s'applique naturellement à quelques questions d'hydrostatique. Pour cela nous allons faire comme si nous avions à commencer l'enseignement de ce chapitre de la physique et ranger les propositions les plus importantes dans un ordre à la fois aussi logique et pédagogique que possible.

Si j'énumère les applications immédiatement après chaque proposition, ce n'est pas que j'estime qu'il faille toujours les traiter à cette place devant les élèves, bien que cela soit souvent le plus naturel, mais c'est seulement pour les rappeler le plus sommairement qu'il est possible et sans répétitions.

Ai-je besoin d'ajouter qu'il n'y aura rien d'original dans cet exposé d'une science qui porte la marque de génies tels que Archimède, Stévin, Pascal, Newton, Euler, Clairaut — de Clairaut surtout, d'après Lagrange.

* * *

LES PREMIÈRES PROPOSITIONS DE L'HYDROSTATIQUE.

I. — Dans la nature, on reconnaît la présence d'une certaine masse liquide à sa surface plane, horizontale et polie au point de réfléchir parfaitement les objets. (Je rappelle que Huygens a tenté d'établir toute l'hydrostatique sur cette proposition, d'ailleurs pour cela insuffisante.) Applications: niveau d'eau, nivellement.

II. — La moindre brise vient ternir la surface du liquide, c'est-à-dire la déformer. Cette facilité à se déformer sous la moindre force permet de distinguer le liquide le plus visqueux du solide le plus plastique.

III. — Les liquides sont presque incompressibles. On peut citer l'expérience d'Oersted (Mach, *Mécanique*, trad. Bertrand, ch. I, VI, 8, p. 88) très ingénieuse et donner un chiffre pour l'eau (0,00005 par at.), et pour le mercure (0,000004). Ce sont ces deux premières propriétés des liquides qui font qu'on les utilise pour la mesure des capacités et des volumes, par conséquent aussi des poids spécifiques. (Méthode du flacon.)

IV. — Les liquides présentent d'autres propriétés physiques, comme leur viscosité ou leur capillarité. Dans l'étude de l'hydrostatique, ces propriétés jouent un rôle secondaire, de sorte qu'au cours de ce chapitre, on peut les négliger et se représenter schématiquement les liquides comme formés de particules solides, sans cohésion, au contact les unes des autres, mobiles sans frottement. On définit ainsi, sous le nom de liquide parfait, une abstraction commode; l'erreur commise n'a pas de conséquence au delà d'une certaine précision et une étude complémentaire pourrait au besoin la corriger.

V. — Les liquides sont pesants, c'est-à-dire soumis à l'attraction terrestre. Et ceci, eu égard à l'idée de liquide parfait, explique leur surface libre horizontale.

VI. — Les liquides supportent, en outre, la pression atmosphérique. Nous la supposons égale en tous points de la surface

libre du liquide, sans cela celle-ci ne serait plus rigoureusement horizontale (seiche).

VII. — Ces diverses observations fondamentales bien établies, nous ferions un retour sur la notion de pression, déjà définie en statique, et par quelques exemples nous montrerions la relation qu'on doit lui reconnaître avec les déformations des corps solides réels (effets mécaniques des pointes d'aiguille ou d'épée, du fil à couper le beurre et des socles de statue). On fait facilement comprendre qu'en raison de la mobilité des particules d'un liquide, les forces qui peuvent agir sur lui, sans le déformer, se réduisent à des pressions normales. Réciproquement, les liquides en équilibre ne peuvent exercer, sur les parois des vases qui les contiennent, que des pressions normales. Il est indispensable de préciser ce qu'on entend par pression normale sur une surface courbe et de faire une expérience d'ailleurs classique qui illustre la réciproque énoncée.

VIII. — Nous énoncerions dès maintenant le principe de solidification. Comme le remarquait M. Meissner, c'est par le moyen de ce principe qu'on peut appliquer au liquide la règle générale de l'isolement progressif.

Il faudrait faire deux remarques pour prévenir des confusions toujours possibles. La première, c'est qu'en appliquant le principe de solidification, on trouve les conditions nécessaires mais non toujours suffisantes de l'équilibre. En d'autres termes : un solide placé dans les mêmes conditions qu'un liquide en équilibre est en équilibre, mais la réciproque n'est pas vraie. La seconde, c'est que la solidification dont on parle ici n'est pas un passage physique réel de l'état liquide à l'état solide, mais une pure supposition, comme l'isolement dans la règle générale énoncée.

IX. — En chaque point d'un liquide en équilibre : il existe *une* pression qui ne dépend pas de l'orientation du plan sur lequel elle s'exerce. On se rappelle que M. Meissner insiste sur l'importance de cette proposition due à Clairaut et qui peut se traduire par une équation différentielle permettant de résoudre généralement les questions d'hydrostatique.

On peut illustrer la proposition par les expériences classiques dues à Pascal, ou se trouvant du moins déjà dans son traité *De l'équilibre des liqueurs*.

L'existence d'une pression en un point résulte des deux propositions précédentes : pression normale et principe de solidification. Pour le montrer, on peut considérer un cylindre tronqué à axe horizontal. Soient, à l'une des extrémités du cylindre, s_0 sa section droite et p_0 la pression qu'elle supporte ; à l'autre extrémité, la section oblique s , dont la normale fait un angle α avec l'axe, et p la pression. On fait le compte de toutes les forces qui agissent sur le cylindre, y compris la pression atmosphérique et le poids du cylindre. La résultante doit être nulle. La somme des projections sur l'axe orienté du cylindre doit donc être nulle aussi. Or, ces projections se réduisent à $p_0 \cdot s_0$ et à $-ps \cdot \cos \alpha$, et comme $s \cdot \cos \alpha = s_0$, on a : $p - p_0 = 0$. Ce qui montre que p ne dépend pas de α , c'est-à-dire de l'orientation du plan s (d'après M. Appell, *Méc.*, T. III, p. 178, cette démonstration est, dans sa simplicité, due à Poincaré).

X. — Dans un liquide pesant, la pression croît avec la profondeur ; elle est la même à un même niveau. Les expériences rapportées par Pascal, et déjà citées, illustrent cette proposition. La démonstration se fait en solidifiant un cylindre droit vertical. La résultante de toutes les pressions exercées par le milieu sur le cylindre doit être égale et directement opposée au poids de celui-ci. On fait alors la somme des projections des forces sur l'axe orienté du cylindre : il n'apparaît plus que la pression sur les bases et le poids du cylindre. En faisant intervenir le poids spécifique du liquide, on fait disparaître la section du cylindre et il ne reste plus, dans l'équation, que la hauteur du cylindre $z - z_0$, le poids spécifique π du liquide et la différence des pressions : $p - p_0 = (z - z_0) \pi$.

On applique cette proposition au calcul des pressions (non des centres de pressions) sur des surfaces planes. On constate, par exemple, que la pression sur un barrage est de $\frac{h^2}{2}$ tonnes par mètre de longueur. On peut donner une idée des pressions sur les écluses et sur les cloches à plongeur.

XI. — On peut définir le plan de charge, plan horizontal placé à une hauteur telle que la pression en un point du liquide ne varierait pas si l'on remplaçait l'atmosphère par une couche liquide limitée à ce plan. En mesurant la profondeur à partir du plan de charge, la pression dans le liquide lui devient simplement

proportionnelle. L'application au siphon et à la pompe aspirante est immédiate.

XII.— Le principe d'Archimède s'illustre soit par l'expérience classique des deux cylindres vide et plein, soit de toute autre façon. Il se démontre au moyen d'un volume quelconque solidifié à l'intérieur du liquide et qui est en équilibre indifférent. La poussée, ou résultante de toutes les pressions, doit donc constamment passer par le centre de gravité du volume solidifié et être égale et directement opposée à son poids. On remplace ensuite le volume solidifié par le corps de même forme et insoluble dans le liquide.

On peut remarquer, tout d'abord, que ce principe s'applique à tout fluide pesant et, ensuite, qu'il a une réciproque, relative à la résultante des pressions exercées par un liquide sur le milieu qui l'enveloppe, résultante qui est égale au poids du liquide.

Les applications sont innombrables : navire, aérostat, flotteur indicateur et flotteur régulateur de niveau, aréomètre, docks flottants, détermination des poids spécifiques, poids d'un corps dans le vide, etc.

XIII. La proposition relative à la pression sur le fond des vases, connue sous le nom de paradoxe hydrostatique se vérifie au moyen de divers appareils connus, déjà décrits par Pascal et se démontre encore par le principe de solidification inventé par Stevin (donc avant Pascal) précisément pour cela : On imagine les trois vases de même fond. Le premier est cylindrique, le second est un tronc de cône évasé vers le haut. On solidifie dans ce dernier un cylindre équivalent au premier vase et il est évident que le liquide restant n'agit pas sur le fond du vase. Le troisième vase est un tronc de cône ayant pour fond sa grande base. Dans le cylindre du premier vase on solidifie une couronne de section triangulaire, telle que le liquide restant ait précisément la forme du troisième vase. Il est non moins évident que les pressions aux divers points à l'intérieur du liquide n'ont pas varié par cette opération et dès lors la pression sur le fond est restée la même. Il est indispensable de faire remarquer que ceci ne contredit pas la réciproque (énoncée) de la proposition précédente.

XIV. — Le principe des vases communicants se démontre encore de la même façon et lorsqu'il y a deux liquides de poids

spécifiques différents, non missibles, on peut solidifier ce qui est au-dessous du niveau de séparation des deux liquides. On se sert aussi de la proposition relative à la variation de pression avec la hauteur. Applications: les niveaux des chaudières et l'appareil de Dulong et Petit (dilatation).

XV. — Dans un fluide incompressible, les pressions se transmettent également dans toutes les directions. C'est le principe de Pascal. Comme la différence des pressions en deux points à l'intérieur d'un liquide est proportionnelle à la différence des profondeurs, si l'on augmente la pression en l'un des points, elle augmentera de la même quantité en tous les autres. Cette proposition ne s'appliquerait pas si la densité variait avec la pression, c'est-à-dire si le liquide était compressible. Avec cette dernière proposition, nous arrivons aux effets les plus puissants: presse et balance hydrauliques, vérin hydraulique au moyen duquel, par exemple, on rétablit la position de la tour Eiffel (8000 tonnes), ascenseur, pont roulant, etc.

Le principe de Pascal fait bien ressortir la différence entre la transmission des forces dans les solides et dans les liquides. (Je choisis d'ordinaire cette occasion de dire quelques mots de la plasticité des solides réels et des propriétés des liquides réels. Je fais observer le mouvement brownien, je présente la goutte de mercure ou la goutte d'huile dans le mélange d'alcool et d'eau, ainsi que l'ascension capillaire pour mettre en évidence les forces de cohésion.)

Durant ce trop long exposé, je ne me suis pas écarté de mon sujet, car la monotonie même de mes démonstrations prouve la généralité de la règle d'isolement progressif énoncée par M. Meissner.

TROISIÈME THÈSE: *Il y a un avantage certain à définir qualitativement la vitesse et l'accélération comme des vecteurs avant même de tenter aucun calcul et de faire intervenir leurs expressions analytiques.*

Le rapport insiste d'abord sur une question de vocabulaire qui a son importance, et je fais remarquer que c'est dans des réunions comme les nôtres qu'il est utile de discuter de semblables remarques: le terme général de *vitesse* (Geschwindigkeit) devrait

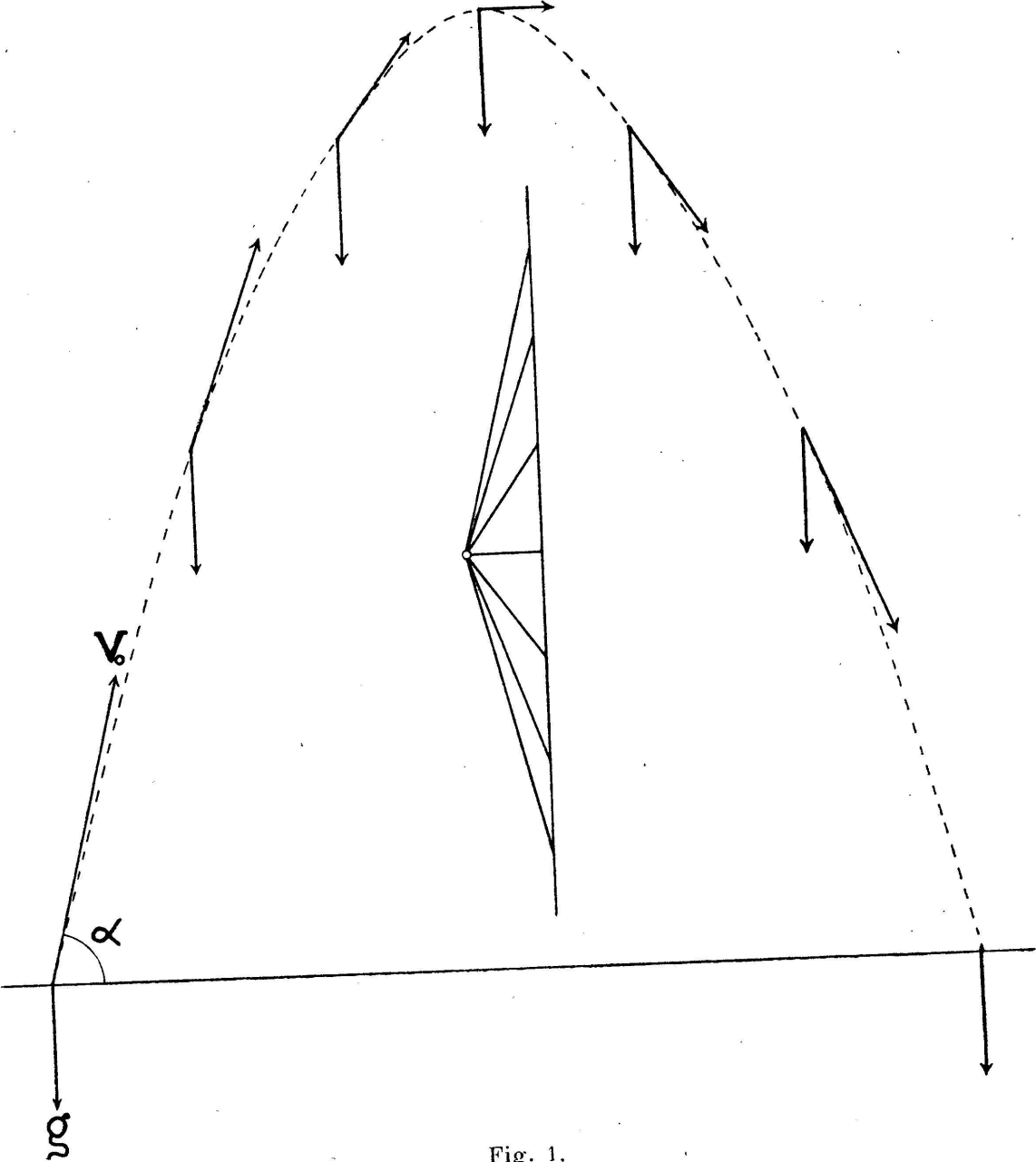


Fig. 1.

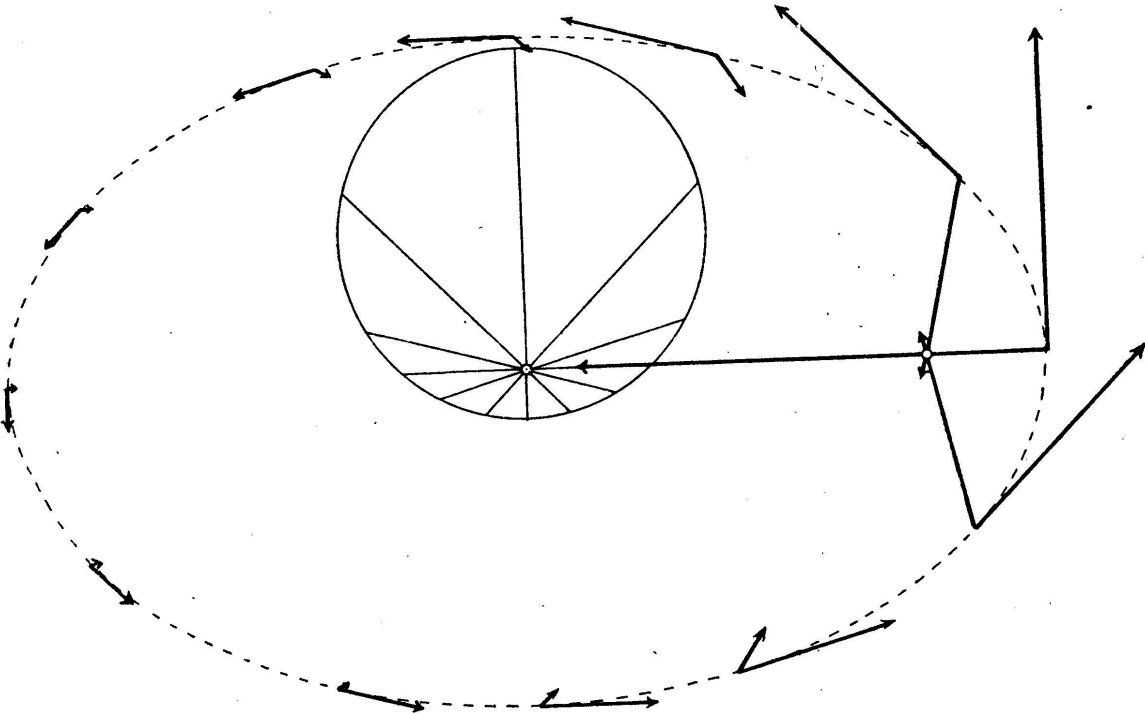


Fig. 2.

être réservé pour désigner à la fois la direction (Richtung, Ziel) et la rapidité ou la lenteur (Schnelligkeit, Schnelle, Raschheit, Langsamkeit).

Le rapport insiste de même pour que les notions de vitesse et d'accélération soient introduites tout de suite avec leur vraie signification de vecteurs. M. Meissner propose donc de *commencer* par une simple description du cas général, où la vitesse est va-

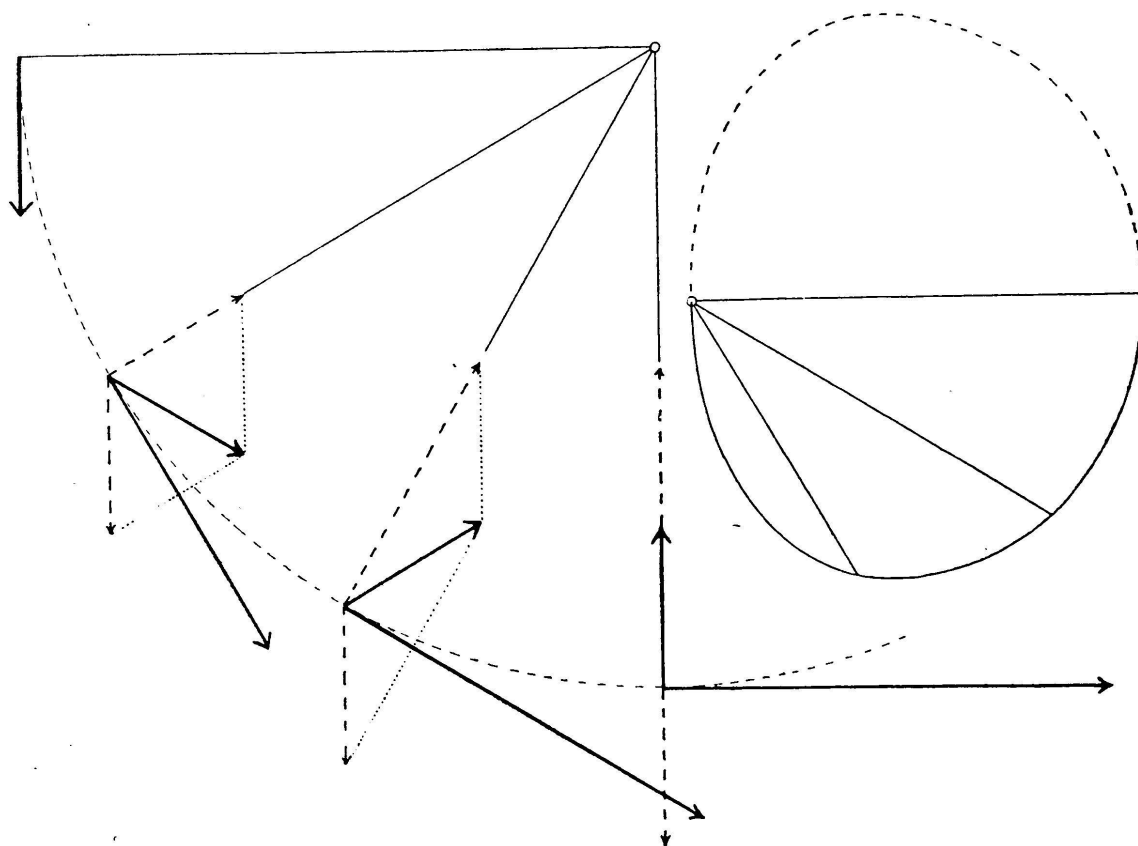


Fig. 3.

riable en grandeur et en direction, et de n'introduire que *dans la suite* le calcul de la vitesse au moyen des exemples classiques des mouvements rectilignes, uniformes ou accélérés, du mouvement circulaire uniforme, etc. Enfin, il ne faudrait jamais négliger de faire la description complète du mouvement, vitesse et accélération, dans chaque cas étudié en dynamique.

Peut-être ne sera-t-il pas inutile de montrer trois clichés présentant les vitesses et les accélérations dans quelques-uns de ces cas.

Le premier cliché est relatif au mouvement d'un projectile dans le vide; on y a représenté l'hodographe.

Le second cliché est relatif au mouvement planétaire et il présente aussi l'hodographe qui est un cercle ¹.

Le troisième cliché représente le mouvement d'un pendule simple, lorsque la position initiale fait un angle droit avec la position d'équilibre. L'hodographe représenté a pour équation: $\rho^2 = k^2 \cos \theta$. La courbe est parcourue d'un mouvement uniforme par l'extrémité du vecteur vitesse. L'accélération totale a , en effet, une grandeur constante égale à l'accélération g de la pesanteur.

QUATRIÈME THÈSE: *En vertu des équations générales du mouvement, il suffira de faire le compte de toutes les actions exercées par le milieu sur le point en chacune des positions qu'il occupe au cours de son mouvement et de former leur résultante, ou force motrice, pour pouvoir établir la loi de ce mouvement.*

C'est ici que nous abordons les principales difficultés de l'enseignement de la mécanique élémentaire, c'est aussi sur ce point que se séparent les auteurs et que les méthodes diffèrent.

Comme M. Meissner l'a montré, la force peut être considérée comme une notion tirée de la statique. Il s'agit d'en faire saisir la relation avec le mouvement. C'est là le principe de la méthode, d'ailleurs classique.

Voici un passage du *Traité de mécanique rationnelle* de M. Paul Appell (éd. 1919) qui montre clairement cette relation:

« Prenons, par exemple, un point matériel sur lequel agit une force dépendant seulement de la position du point. En donnant au point différentes positions et mesurant statiquement la force dans chacune de ces positions, on connaîtra la loi de la variation de la force avec la position du point; analytiquement, on connaîtra les projections X , Y , Z de la force en fonction des coordonnées x , y , z du point. Si, ensuite, on lance le point, en le soumettant aux forces considérées, il prend un mouvement dont on obtient les équations sous forme finie, en intégrant les équations:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = X \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y \quad m \frac{d^2 z}{dt^2} = Z$$

¹ Cf. la démonstration très simple de Darboux, citée par M. BAILLAUD, *Cours d'Astronomie*, T. II, p. 251; et l'exposé très clair de Ch. CAILLER, *Introduction géométrique à la mécanique rationnelle*, p. 485 seq.

où les deuxièmes membres X , Y , Z sont des fonctions connues de x , y , z . » (T. I, p. 102, 4^{me} éd., 1919).

On peut considérer¹ ce procédé comme une méthode générale de résolution des problèmes de dynamique. Cette méthode consiste, en quelque sorte, à établir un pont entre la cinématique et la statique par le moyen de l'équation de Newton. Il est évidemment nécessaire alors d'insister sur le fait que, dans les diverses positions qu'occupe le point au cours de son mouvement, *le point n'est généralement pas en équilibre*. L'ensemble des actions du milieu sur le mobile peut encore être remplacé, comme en statique, par un système de forces, mais celui-ci possède généralement une résultante non nulle et c'est elle qui détermine le mouvement, d'où son nom de force motrice.

Quant on adopte cet ordre d'exposition, la réserve formulée est si importante qu'elle doit conditionner tout l'enseignement de la dynamique. Il s'agit de dissocier les notions de force et d'équilibre, unies jusqu'ici, pour acquérir la notion de la force motrice à laquelle ne s'oppose aucune autre force. Ce résultat ne peut être atteint qu'en bannissant de l'enseignement élémentaire les forces d'inertie, centrifuges et centrifuges composées, puisque celles-ci ont pour but de permettre de considérer les positions du mobile comme des positions d'équilibre.

Prenons un ou deux exemples: Un point est suspendu à l'extrémité d'un ressort. On repère sa position sur l'axe moyen du ressort, puis on tend le ressort. On sait, par des expériences de statique, que la réaction du ressort est proportionnelle à son allongement et dirigée de telle sorte qu'elle tend à ramener le point à sa position d'équilibre. En négligeant la masse du ressort et appliquant l'équation de Newton, on trouve immédiatement

$$mj = - kx$$

équation caractéristique du mouvement harmonique simple. L'expérience vérifie alors ce résultat et l'élève comprend que les diverses positions du point ne sont pas des positions d'équilibre, bien que la force qui agit soit la même qu'en statique. Il faut excepter toutefois la position initiale qui est une position d'équilibre.

¹ M. Appell ne se place pas à ce point de vue.

Pour la chute libre ou le mouvement du point glissant sur le plan incliné poli, même conclusion, puisque, à chaque instant, la réaction du plan peut aussi se déterminer par l'expérience statique.

L'étude du mouvement d'un projectile dans le vide ne fait intervenir aucune difficulté à cet égard et il permet d'énoncer le principe de l'indépendance de l'effet des forces et du mouvement antérieurement acquis.

Au contraire, si le frottement intervient, il n'est déjà plus entièrement possible de déterminer le mouvement par des expériences statiques, puisque le frottement au cours du mouvement est plus petit que le frottement au départ.

Selon l'ordre où nous avons présenté ces exemples, ce serait ici, nous semble-t-il, qu'interviendrait une nouvelle généralisation de la notion de force; car c'est par des expériences portant sur le mouvement lui-même qu'on peut mesurer les forces provenant du frottement, de la résistance de l'air, de la viscosité des liquides, des phénomènes d'induction électro-magnétique, etc.

D'ailleurs, comme le fait remarquer M. Meissner, on éclaire vivement le caractère et le sens de cette dernière généralisation de la notion de force dans son application au mouvement, en considérant que, *dans tous ces cas*, c'est la trajectoire qui est connue. Quant aux forces, elles n'entrent plus dans le problème qu'à titre d'inconnues et n'ont ainsi qu'une sorte d'existence hypothétique ou « mathématique ». Newton le remarquait déjà, à propos de l'attraction universelle. Dans bien des exemples, du reste, cette force hypothétique pourrait réellement se mesurer. Par exemple, la force se mesurerait à l'allongement d'un ressort, à la rupture d'un fil, en général à la déformation des liaisons. A titre d'exemple, on peut parler ici du pendule simple, correspondant au cas où l'on pourrait observer les déformations des liaisons, et, d'autre part, du mouvement planétaire, où l'on ne peut mesurer directement les liaisons dont la nature reste hypothétique.

CINQUIÈME THÈSE: Nous parvenons ainsi à la dernière des thèses par lesquelles nous avons essayé de résumer le rapport de

M. Meissner, et nous abordons du même coup la plus grande des difficultés qui nous y aient été présentées.

L'équation de Newton qui, du point de vue où nous nous plaçons ici, résume toute la dynamique n'est, à tout prendre, qu'une façon d'exprimer le principe d'inertie. Celui-ci n'est vrai que par rapport à un système de référence absolument fixe ou animé d'un mouvement rectiligne uniforme par rapport à un système de référence absolument fixe. Or, M. Meissner et, avec lui, tous les mécaniciens contemporains, se refusent à admettre un système de référence au repos absolu. Comment résoudre, devant de jeunes esprits avides de logique, une contradiction en apparence aussi flagrante ?

La solution proposée par le rapport de l'année dernière consiste à suivre les indications de l'expérience. Elle enseigne que les lois de la mécanique se vérifient approximativement par rapport à certains systèmes de référence dits privilégiés, et non par rapport à tout système arbitrairement choisi. C'est la Terre dans la plupart des cas, simplement parce que le rayon de courbure de la trajectoire d'un de ses points est grand par rapport à la trajectoire du mouvement étudié. Dans quelques autres cas, l'expérience nous invite à choisir un autre système. Ainsi, pour étudier la variation de la pesanteur ou de la marche d'une horloge avec la latitude, Huygens a choisi le centre de la Terre et les directions de trois étoiles dites fixes. Et ainsi de suite.

Ces divers choix ne préjugent en aucune façon la question de savoir s'il existe ou non un système de référence absolument fixe. Ils dépendent de la précision de nos expériences de mécanique.

Ce qui précède justifie la première partie de notre thèse : *Les lois de la mécanique se vérifient avec une approximation, suffisante dans la plupart des cas, en choisissant la Terre comme système de référence. Dans quelques cas particuliers, on est amené à choisir un autre système par rapport auquel ces lois se vérifient plus exactement. Cela n'implique pas la nécessité de définir un système absolu.*

La marche indiquée offre l'avantage de poser clairement le problème, de suivre exactement les indications de l'expérience, de n'introduire aucune solution arbitraire, enfin elle laisse le champ libre aux recherches entreprises pour énoncer les lois de la mé-

canique de telle façon qu'elles soient vérifiées dans n'importe quel système de référence.

Pour être conséquent avec la solution qu'on vient de rappeler, il ne faudra pas admettre de systèmes de référence arbitraires. Il est clair, par exemple, que les mouvements relatifs aussi bien qu'un équilibre relatif ne pourront être traités que comme des mouvements apparents ou comme un équilibre apparent. Les lois de la mécanique, ne peuvent leur être appliquées que si on rapporte ces mouvements ou équilibre au système par rapport auquel ces lois se vérifient.

On sait que le principe de D'Alembert, en introduisant des forces fictives appelées forces d'inertie, permet de ramener tous les problèmes de dynamique à des problèmes d'équilibre. On voit ici la seconde raison pour laquelle M. Meissner se refuse à introduire ce principe dans l'enseignement de la mécanique élémentaire: Il s'agira, au contraire, de rétablir, dans chaque cas, la véritable nature du mouvement, en rapportant celui-ci à la Terre ou à tel autre système indiqué par l'expérience. De cette façon les forces d'inertie ne s'introduiront pas.

J'ai ainsi exposé la seconde partie de la dernière thèse: *En rapportant les mouvements et équilibres relatifs au système indiqué, c'est-à-dire en les considérant comme des mouvements ou des équilibres apparents, on peut leur appliquer les lois de la mécanique sans introduire les forces d'inertie qui doivent, dans tous les cas, être déclarées fictives.*

Il me reste à appliquer ces remarques de M. Meissner à quelques exemples.

Les exemples du train, de l'ascenseur, du régulateur à force centrifuge sont particulièrement clairs.

Lorsqu'un convoi s'arrête, il est soumis à une accélération négative. C'est donc *lui* qui vient à l'encontre des voyageurs qui, eux, continuent simplement leur mouvement rectiligne et uniforme par rapport au sol.

Lorsqu'un ascenseur s'arrête, en descendant, mêmes constatations. Il est soumis à une accélération négative verticale, dirigée de bas en haut, et comme les objets qu'il contient tendent à continuer leur mouvement rectiligne et uniforme par rapport

au sol, ils sont pressés contre le plancher de l'ascenseur et leur poids apparent en est augmenté. Il est diminué, au contraire, au départ, lorsque l'ascenseur se met à descendre. Si l'ascenseur tombait en chute libre, les objets ne seraient plus pressés sur lui par la pesanteur, puisque tous les corps tombent également vite et leur poids apparent serait nul.

Je crois qu'on ne peut être assez concret sur ce point, et quelques expériences ne sont pas de trop; elles sont d'ailleurs rudimentaires. Une planchette horizontale et une bille, ou une figurine de bois, suffisent; la planchette est mise rapidement en mouvement dans son plan.

Une des masses du régulateur à force centrifuge tournant autour de l'axe de l'appareil est ramenée vers l'axe par la résultante de deux forces: 1^o son poids, 2^o la rigidité de la tige à l'extrémité de laquelle elle est fixée. Sans cette résultante, la masse prendrait un mouvement rectiligne et uniforme. La force centripète est donc nécessaire et il n'y a pas d'autre force (centrifuge ou autre) appliquée à la masse.

Un mobile qui parcourt une circonférence d'un mouvement uniforme est animé d'une accélération centripète égale à $\frac{v^2}{R}$ donc, lorsque la masse du régulateur décrit une circonférence d'un mouvement uniforme, c'est que la résultante des forces dirigées vers le centre du cercle égale $m \frac{v^2}{R}$. D'où la solution numérique du problème.

Si le cycliste tombe, en faisant un tournant trop brusque, c'est qu'il n'avait pas créé une force centripète assez grande: on lui facilite la chose en inclinant la piste et en lui offrant ainsi un appui suffisant.

En revenant à l'exemple de l'ascenseur et en tenant compte de ce qu'on vient de dire de la force centripète, on explique facilement la variation du poids avec la latitude.

On voit qu'en effet, on peut se passer de la force centrifuge ainsi que de toute autre force d'inertie. Il convient cependant de dire que quelques auteurs notables, tel Poisson, Mach, etc., désignent par force centrifuge l'action du point sur les liaisons qui l'obligent à suivre sa trajectoire courbe. Il va sans dire

qu'alors la force centrifuge est réelle mais qu'elle ne s'exerce pas sur le mobile. Poisson par exemple, explique la chose tout au long.

* * *

Pour caractériser la méthode proposée par M. Meissner, on pourrait dire qu'elle consiste à dégager, dans l'expérience déjà acquise de l'élève, les seules notions susceptibles d'une généralisation complète. Ces notions sont celles de force, de vitesse, et d'accélération.

Comme la notion de force est surtout liée à des expériences de statique, c'est par cette discipline qu'il faudra commencer l'exposé de la mécanique.

Mais un danger nous menace. On risque d'engager l'élève dans une mauvaise direction à travers la dynamique; car en statique, une force n'existe jamais isolément. En dynamique, c'est le contraire, il n'existe pas de force faisant équilibre à la force motrice.

On évitera cette confusion des deux domaines de la statique et de la dynamique, en mettant constamment en lumière la relation de la force motrice avec l'accélération et en n'introduisant jamais les forces d'inertie qui ont pour but de réduire, d'une façon fictive, les problèmes de la dynamique à des problèmes de statique.

Pour procéder systématiquement, il faudrait maintenant comparer la méthode de M. Meissner à d'autres méthodes. On pourrait distinguer ainsi sa valeur particulière, marquer par où d'autres méthodes peuvent présenter des avantages. J'avais pensé à indiquer le plan de quelques ouvrages: d'«*Une première leçon de dynamique*» de M. Emile PICARD, que devraient avoir lue tous ceux qui enseignent la mécanique; le tome III du *Cours de mathématiques spéciales* que M. J. HAAG consacre à la mécanique (1922) et qui s'inspire des leçons de M. PAINLEVÉ à la Faculté des Sciences de Paris (1904-05); du programme officiel français si remarquablement réalisé par les *Leçons de mécanique élémentaire* de MM. Paul APPELL et J. CHAPUIS ou par le *Traité de mécanique* de M. C. GUICHARD (éd. 1924). J'aurais cité les deux

petits volumes de M. H. BÉGHIN intitulés *Statique et dynamique* dans la collection Colin, surtout la *Statique*, la *Dynamique générale* et l'*Hydrostatique* de M. H. BOUASSE, ainsi que la *Mécanique appliquée* de M. J. PERRY, ouvrages si féconds en exemples de toutes sortes et en renseignements indispensables à qui veut intéresser ses élèves à une science à la fois si voisine des applications et si difficile à appliquer correctement.

Mais le temps m'est mesuré, je vais donc abandonner cette idée; je ne puis cependant renoncer à dire quelques mots du remarquable petit livre que M. Ch.-Ed. GUILLAUME a écrit avec tant de soin et qui a pour titre: *Initiation à la mécanique* (1909).

Il faut rappeler tout d'abord que M. Guillaume se place à un point de vue tout opposé à celui qu'adopte M. Meissner. Il remarque qu'en réalité, l'équilibre des solides n'est possible que grâce aux forces antagonistes, frottement ou réaction élastique, que développent automatiquement les forces tendant à déplacer un corps. Or, ces forces antagonistes sont d'une nature complexe et leur étude ne peut être abordée que lorsque l'on connaît les effets plus simples que les forces peuvent engendrer (p. XII). M. Guillaume commence donc la mécanique par l'étude de la dynamique et, sur ce point, on ne saurait trouver un accord entre les deux méthodes comparées.

Mais, si l'on y regarde de plus près, on constate que les raisons invoquées par M. Guillaume pour adopter l'ordre indiqué tendent à mettre en évidence le rôle du frottement et des résistances élastique, rôle que M. Meissner s'est particulièrement attaché à marquer au début de la statique. En seconde ligne, ces deux auteurs se trouvent d'accord pour choisir la notion de force comme base du développement élémentaire de la mécanique. « L'enfant, dit M. Guillaume, a le sens de la force, que lui donne l'exercice de ses muscles; en lui parlant de forces, on fait appel à une notion qui n'a rien de mystérieux pour qui ne cherche pas encore les subtilités, et sur laquelle on peut greffer d'autres notions plus cachées » (p. XII).

En troisième lieu, MM. Guillaume et Meissner se trouvent d'accord pour mettre en garde les éducateurs contre un certain esprit de géométrie: « L'esprit du mathématicien, dit encore M. Guillaume, est trop souvent préoccupé du seul développement

logique des vérités évidentes pour donner, dans un enseignement élémentaire d'une science de la nature, toute l'importance désirable à la découverte de vérités qui ne sont ni évidentes ni nécessaires » (p. X). Aussi rejette-t-il les questions d'unités et de formules à la fin de son petit ouvrage (p. 152-160) si important par l'influence qu'il a déjà exercée sur l'enseignement de la mécanique en France et dans la Suisse romande.

S'il s'agissait maintenant de comparer d'une façon tout à fait générale les tendances auxquelles correspondent, d'une part le rapport de M. Meissner, d'autre part l'ouvrage de M. Ch.-Ed. Guillaume, nous dirions: L'effort de M. Meissner vise, avant tout, à établir avec exactitude et solidité la notion de force et ses applications sur une expérience directe et de plus en plus précise. L'effort de M. Guillaume vise, avant tout, à dégager la notion de masse. « La notion de masse est cachée à l'enfant parce que celui-ci ne distingue pas, avant qu'on ait attiré son attention sur leur divergence fondamentale, les effets des forces employées à soulever une pierre ou à la mettre en mouvement par une poussée qui lui permette de franchir seule un espace étendu; en d'autres termes, il distingue mal entre le poids et la masse » (p. XII et XIII).

M. Guillaume présente la notion de masse sous divers aspects au cours de son travail. Mais c'est en rattachant la masse à la notion de travail et en la considérant comme le véhicule du travail qu'il développe une suite d'exemples capables de se graver dans la mémoire du débutant.

Sans doute, un bon élève suivant des leçons inspirées par le rapport de M. Meissner se rendra compte que, sur les cinq notions fondamentales de la mécanique: système de référence, vitesse, accélération, force et masse, cette dernière est fort importante. Elle joue en effet, à elle seule, un double rôle, étant à la fois coefficient d'inertie et coefficient d'attraction universelle. Mais si le bon élève parvient à comprendre l'importance de cette notion et sa vraie signification, en sera-t-il de même de l'élève auquel on ne peut demander de porter sa réflexion sur tout ce qui lui est présenté au cours des nombreuses leçons qu'il reçoit chaque jour? Je me demande donc s'il ne serait pas opportun d'introduire la notion de masse dès le début de l'en-

seignement de la statique, par exemple à propos de la notion de champ de forces dont elle est peut-être inséparable.

En terminant, je tiens à présenter à M. le professeur Meissner l'expression de ma reconnaissance et de celle de tous mes collègues. Non seulement il nous a donné des indications précises, nombreuses et importantes sur la manière dont on pouvait préparer utilement des candidats à l'Ecole polytechnique; mais il nous a donné une méthode d'ensemble bien coordonnée, répondant au désir de concentration des programmes si souvent exprimé. Enfin, il nous a tous fait réfléchir et nous permettra de mettre en commun nos expériences.

Je me suis souvent laissé aller à un certain scepticisme sur l'utilité de la pédagogie, et j'avoue que j'ai peine à m'en défendre lorsqu'il s'agit de cours professés par des hommes qui n'enseignent pas eux-mêmes la branche dont ils parlent. Mais il s'agit au contraire ici de discuter les remarques d'un savant qui consacre tout son temps à l'enseignement d'une science, celle même dont nous sommes chargés de transmettre les éléments: la mécanique. Léonard de Vinci disait qu'elle «est le paradis des sciences mathématiques, car c'est par elle que ces sciences atteignent le fruit mathématique».

C'est par une transmission rationnelle des expériences antérieures, autant que par des découvertes, que la science progresse; ou plutôt, c'est par une transmission rationnelle des anciennes découvertes que de nouvelles continuent de rester possibles. Or, cette transmission exige de continuelles revisions, l'idéal étant de ne transmettre que ce qui est durable, et cette révision elle-même n'est possible que par la comparaison des méthodes, l'échange des idées, c'est-à-dire la discussion entre hommes compétents. Nous souhaitons donc vivement qu'elle s'engage sur les thèses qui viennent d'être présentées.
