PROGRAMME DE JUILLET 1909 (GARÇONS)

COURS DE PHYSIQUE

A L'USAGE

DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES. — DES COURS COMPLÉMENTAIRES
ET DES CANDIDATS AU BREVET ÉLÉMENTAIRE

AVEC TROIS PLANCHES HORS TEXTE, DONT DEUX EN COULEURS

PAR

L. PERSEIL
PROFESSEUR A L'ÉCOLE SUPÉRIEURE
DE MELUN

B. GAUTHIER-ECHARD
ANCIENNE ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE
SUPÉRIEURE DE FONTENAY-AUX-ROSES
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NORMALE
D'INSTITUTRICES DE BOURGES

Troisième Année

NOUVELLE ÉDITION REVUE ET CORRIGÉE

PARIS
LIBRAIRIE CLASSIQUE FERNAND NATHAN
16 ET 18, RUE DE CONDÉ (6e)

A LA MÊME LIBRAIRIE

Envoi franco contre mandat ou timbres-poste

PROGRAMME DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES

PERSEIL et GAUTHIER. — **COURS DE CHIMIE DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES.**

Première année. 1 vol. in-8°, relié. 1 75
Deuxième année. 1 vol. in-8°, relié. 1 60
Troisième année. 1 vol. in-8°, relié. 1 50
— Les trois années réunies en un beau vol., broché, 3 75; relié. 4 25

A. AMMANN et E. COUTANT. — **COURS D'HISTOIRE DES ÉCOLES PRIMAIRES SUPÉRIEURES.**

— *Première année.* — **Histoire de la France depuis le début du XVI° siècle jusqu'en 1789. 1 vol. in-12, relié. 2 50**
— *Deuxième année.* — **Histoire de la France depuis 1789 jusqu'à la fin du XIX° siècle. 1 vol. in-12, relié. 3 »**
— *Troisième année.* — *Le Monde au XIX° siècle :* **Tableau politique et économique du Monde contemporain. 1 vol. in-12, relié. 3 »**
— **Cours supérieur et complémentaire. Notions sommaires d'histoire générale et revision de l'histoire de France. 1 vol. in-12, relié. 2 50**

G. DODU. — **COURS DE GÉOGRAPHIE.**

— *Première année.* — **Principaux aspects du Globe. La France. 1 vol. in-8°, relié. 3 »**
— *Deuxième année.* — **L'Europe moins la France. 1 vol. in-8°, relié. 3 »**
— *Troisième année.* — **Le Monde moins l'Europe. 1 vol. in-8°, relié. 3 »**
— **Cartes d'ensemble pour accompagner la première année. 1 vol. in-8°. 0 80**
— **Cartes d'ensemble pour accompagner la deuxième année. 1 vol. in-8°. 1 »**
— **Cartes d'ensemble pour accompagner la troisième année. 1 vol. in-8°. 1 »**
— **Les Cartes d'ensemble réunies en un seul volume. 2 50**

BOURGUEIL. — **COURS DE DROIT.**

— *Deuxième année.* — **Instruction civique et droit usuel. 1 vol. in-12, relié. 1 35**
— *Troisième année.* — **Droit usuel et Économie politique. 1 vol. in-12, relié. 2 »**

A. JACQUET et LACLEF. — **COURS DE MATHÉMATIQUES.**

— **Arithmétique du Brevet élémentaire. 1 vol. in-12, relié. 2 25**
— **Solutions raisonnées des Exercices et Problèmes contenus dans l'Arithmétique du Brevet élémentaire. 1 vol. in-12, broché. 3 »**
— **Cours d'Arithmétique théorique et pratique. 1 vol. relié. 3 »**
— **Solutions raisonnées des Exercices et Problèmes contenus dans le Cours d'Arithmétique théorique et pratique. 1 vol. in-12, broché. 3 50**
— **Cours de Géométrie théorique et pratique. 1 vol. relié. 3 50**
— **Cours d'Algèbre élémentaire. 1 vol. relié. 2 »**
— **Compléments d'Arithmétique, de Géométrie, d'Algèbre. 1 vol. relié. 3 50**

PRÉFACE

Les nouveaux programmes de physique pour les écoles primaires supérieures ont accentué le caractère pratique qui se trouvait déjà indiqué dans les anciens, mais ils ont groupé les matières dans un ordre mieux approprié au développement progressif des élèves pendant leurs trois années d'études.

Nous nous sommes efforcés de nous inspirer de cet esprit dans la rédaction de cet ouvrage en lui donnant un caractère pratique et simple fondé sur l'observation et l'expérience.

D'une manière générale, chaque chapitre comprend la matière d'une leçon. Quelques-uns, comme ceux qui traitent des miroirs et des lentilles, pourront paraître, à première vue, un peu étendus; mais on voudra bien remarquer que cette étendue est plus apparente que réelle car, outre des gravures nombreuses, ces chapitres comprennent des explications en caractères fins dont l'étude est facultative.

La partie relative à l'électricité a été traitée avec le souci de présenter le sujet d'une manière élémentaire, accessible à de jeunes esprits. Nous avons introduit, au début de l'étude du courant électrique, l'emploi des instruments de mesure : ampèremètre et voltmètre. Nous précisons ainsi dans l'esprit des élèves des notions souvent difficiles à comprendre pour eux et nous les mettons à même de traiter aisément des petits problèmes sur les diverses grandeurs électriques.

Nous avons insisté particulièrement sur les diverses manières d'utiliser l'énergie électrique dont l'importance industrielle et économique va sans cesse en s'élargissant.

Suivant les termes du programme, nous avons limité l'étude de l'électricité statique aux notions strictement nécessaires à une connaissance sommaire de l'électricité atmosphérique, c'est pourquoi nous avons laissé de côté les machines électriques, les condensateurs, etc.

Des sommaires, sous forme de tableaux synoptiques, présentent d'une manière commode l'ensemble des matières de chaque chapitre et facilitent les revisions. On trouvera en outre, à la fin de chaque leçon, l'indication d'un certain nombre d'exercices d'observation ainsi que des expériences simples, faciles à réaliser à l'aide d'appareils peu compliqués.

Enfin, nous avons réuni les formules éparses dans l'ouvrage en un tableau qui facilitera le travail des élèves en leur épargnant souvent des recherches.

COURS DE PHYSIQUE

TROISIÈME ANNÉE

LIVRE I

NOTIONS DE MÉCANIQUE

CHAPITRE I

FORCES

PLAN

I. — Inertie de la matière.

Un corps soustrait à toute action extérieure	1° Est : ou au repos ou animé d'un mouvement uniforme, c'est-à-dire qu'il parcourt des *espaces égaux* en des *temps égaux* (espace = vitesse × temps). 2° Ne peut modifier de lui-même cet état.

II. — Étude des forces.

Définition d'une force	Cause capable de modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps.	
Éléments d'une force	1° *Point d'application;* 2° *Direction;* 3° *Sens;* 4° *Intensité.*	
Résultante des forces	1° Concourantes	Elle est donnée par la règle du *parallélogramme des forces.*
	2° Parallèles	Elle est égale à la somme ou à la différence des forces selon que celles-ci sont de même sens ou de sens contraires.
Couple	Est représenté par deux forces égales et de sens contraires agissant en deux points d'un corps. Son action est de faire pivoter le corps sur lui-même.	

1. Inertie de la matière en mouvement.

Nous avons vu dans le cours de 1re année qu'un corps est au repos quand ses distances à des points considérés comme fixes, tels que les arêtes d'une chambre, d'un mur ne varient pas. Il est évident que cette immobilité est toute relative puisque la Terre se déplace dans l'espace.

Lorsque les distances du corps aux points considérés comme fixes varient, nous disons que le corps est en mouvement ; on lui donne alors le nom de mobile et la ligne que décrit un de ses points **P** dans ce mouvement est dite **trajectoire** de ce point (*fig.* 1).

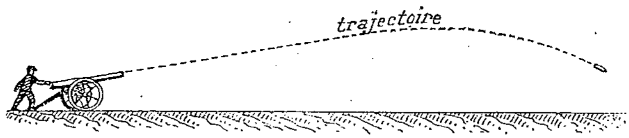

Fig. 1. — Trajectoire décrite par un boulet lancé par un canon.

2. Inertie d'un corps en mouvement.

Nous savons par expérience qu'un corps au repos ne peut, de lui-même, se mettre en mouvement ; on admet qu'inversement un corps en mouvement ne peut s'arrêter de lui-même.

On exprime ce fait en disant que les corps sont **inertes.**

L'inertie de la matière permet d'expliquer nombre de phénomènes : lorsqu'un train s'arrête un peu brusquement en entrant en gare, les voyageurs, dont le corps n'est pas solidaire du wagon, conservent le mouvement que leur communiquait la voiture et sont projetés en avant.

Les accidents d'automobiles confirment d'une manière terrifiante l'inertie de la matière. Lorsque, par suite d'une fausse manœuvre, la voiture vient buter contre un arbre, elle est arrêtée instantanément, mais il n'en est pas de même pour le conducteur qui se trouve lancé à la vitesse de 60 à 80 kilomètres par exemple et vient, avec cette vitesse, s'écraser la poitrine contre le volant de direction.

Lorsqu'on veut descendre d'une voiture ou d'un tramway en marche, il faut prendre soin de se pencher assez fortement dans la direction opposée à celle de la voiture (*fig.* 2). L'inertie a pour effet de ramener le corps verticalement au moment où l'on pose le pied sur le sol. Sans cette précaution on s'exposerait à une chute dangereuse.

On réalise une expérience très simple de l'inertie de la matière en déplaçant rapidement une assiette sur laquelle on a posé une pièce de monnaie (*fig.* 3). Si l'on vient à arrêter brusquement la main contre un obstacle quelconque, la pièce continue à se déplacer et peut être projetée hors de l'assiette. Il en est de même pour une boulette de mie de pain plantée au bout d'une baguette effilée. On déplace rapidement la baguette de manière qu'elle vienne buter contre un obstacle rigide comme

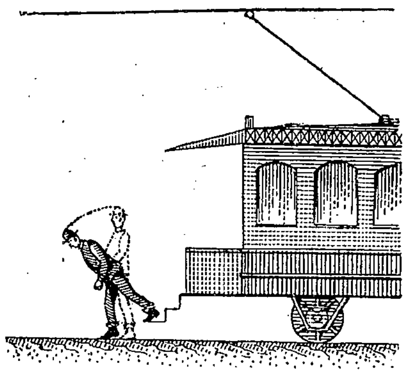

Fig. 2. — *Manière de descendre d'une voiture en marche.* — Le voyageur se penche fortement; quand son pied pose à terre, l'inertie de son corps encore animé du mouvement de la voiture le ramène sur la verticale.

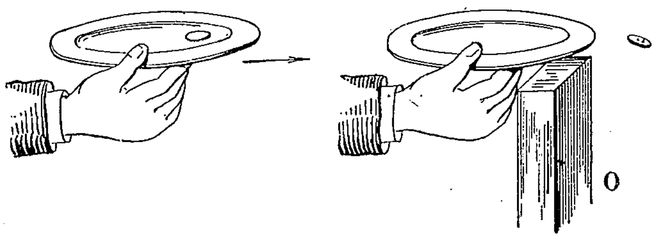

Fig. 3. — *Inertie d'un corps en mouvement.* — Lorsque la main qui déplace l'assiette est arrêtée brusquement par un obstacle, la pièce de monnaie continue à se mouvoir et se projette en avant.

l'arête d'un bureau ; on voit alors la boulette projetée dans l'espace.

L'inertie de la matière en mouvement semble être en contradiction avec un certain nombre de faits : par exemple, une bille de verre lancée sur le sol ne tarde pas à s'arrêter ; mais cette contradiction n'est qu'apparente, car plusieurs causes (le frottement de la bille contre le sol, les aspérités qu'elle rencontre sur son chemin, la résistance de l'air) ralentissent son mouvement à chaque instant. A mesure que ces causes de ralentissement sont diminuées, le mouvement dure davantage ; c'est ainsi que la bille roulera plus longtemps sur une surface lisse, comme celle d'un parquet bien ciré et, s'il était possible de la faire rouler sans frottement sur un plan indéfini, dans le vide, affranchie en un mot de toutes les causes pouvant faire obstacle à son mouvement, elle ne s'arrêterait jamais.

3. Forces.

L'hypothèse que nous venons de faire d'une bille roulant indéfiniment est, en fait, irréalisable. Que la surface de roulement soit aussi lisse et étendue qu'on pourra l'obtenir, la bille finira par s'arrêter, car il est impossible de supprimer la résistance de l'air ni le frottement. D'une manière générale le mouvement d'un corps mobile ne s'entretient pas de lui-même, tantôt il se précipite,il s'accélère, comme on dit, tantôt il se ralentit et nous verrons bientôt à préciser ces notions de mouvements différents (§ 14).

A toutes les causes qui interviennent pour modifier le mouvement d'un corps ou le tirer du repos, on donne le nom de **forces**. Nous avons déjà eu maintes occasions, dans le cours de 1re et 2e année, d'étudier un certain nombre de forces comme le *poids* d'un corps qui tend à le faire choir vers le sol, la pression de l'eau sur les parois d'un corps immergé, la *pression* atmosphérique, la **force élastique** d'un gaz ou d'une vapeur, la poussée produite par la dilatation des corps, etc.

4. Représentation graphique d'une force.

Nous avons vu (C. de 1re année), qu'on représente graphiquement une force par une droite partant du point d'application dans la direction de la force et dont la longueur est proportionnelle à l'intensité de cette force (*fig.* 4).

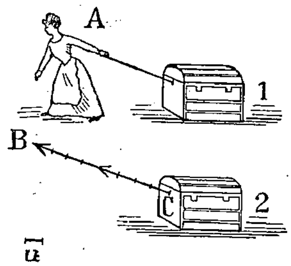

Fig. 4. — *Représentation graphique d'une force.* — La direction, le sens et la longueur de la flèche CB figurent la direction, le sens et l'intensité (= 8 *f*) de la force exercée par la personne A. — En u, longueur correspondant à une force de valeur *f*.

5. Forces concourantes.

Il arrive fréquemment qu'un même corps est sollicité à la fois par plusieurs forces; un exemple simple nous est offert par les gouttes d'eau tombant par un jour de pluie et de grand vent. Tandis que le poids des gouttes tend à les faire tomber verticalement, le vent les chasse horizontalement. Sous l'action de ces deux forces, elles prennent une direction oblique.

Lorsque deux forces ont un même point d'application, on les appelle **forces concourantes.** Attachons à un pied de table (*fig.* 5) deux cordes que nous faisons tirer simultanément et le plus régulièrement possible par deux personnes. Les cordes nous figurent la direction de deux forces concourantes **AB, AC.** Sous l'action des efforts exercés, le point **A** de la table se déplace, non pas dans la direction de l'une ou l'autre corde, mais dans

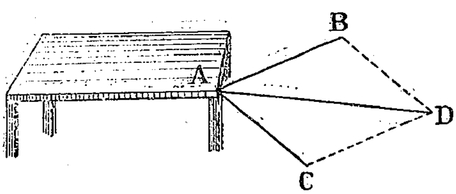

Fig. 5. — Expérience montrant l'action de deux forces concourantes sur un objet.

une direction intermédiaire, comme s'il obéissait à l'action d'une force unique dirigée suivant **AD**.

Les chalands qui transportent les marchandises sur les canaux sont ordinairement tirés obliquement par des chevaux ou des ânes circulant sur un chemin de halage bordant la

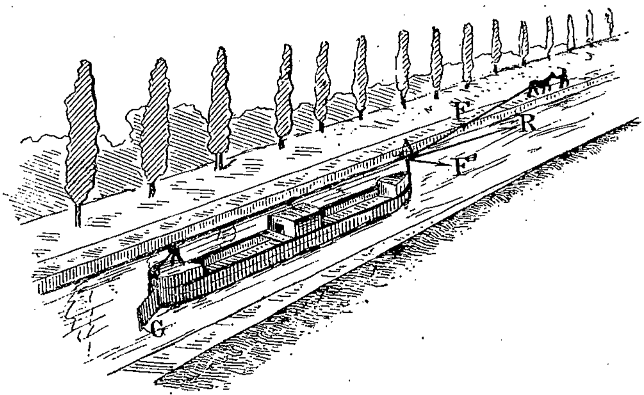

Fig. 6. — *Résultante de deux forces concourantes.* — Le bateau subit à la fois la traction **AF** de la corde et la réaction de l'eau sur le gouvernail en **G** produisant l'effet d'une force **AF'**. Le bateau suit la direction intermédiaire **AR**.

rive (*fig.* 6). Une longue corde relie l'attelage à l'avant **A** du bateau. Celui-ci devrait suivre la direction de la force **FA**; or il reste dans l'axe du canal. Ce fait est dû à la réaction de l'eau sur le gouvernail **G** qui tend à faire tourner l'avant dans la direction **AF'** comme si une autre force **F'** s'exerçait en **A**. Le chaland suit alors la direction intermédiaire **AR**.

D'une manière générale, lorsque *deux forces* **f** *et* **f'** *sont concourantes* (*fig.* 7), *on peut considérer le résultat de leur action commune comme dû à une force unique* **F** *appelée* **résultante,** *ayant même point d'application et dont la direc-*

tion, le sens et l'intensité sont donnés par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux droites représentant ces deux forces appelées **composantes.**

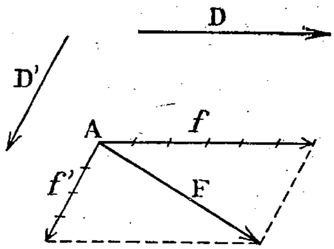

Fig. 7. — Résultante de deux forces concourantes.

Lorsque plusieurs forces situées ou non dans le même plan sont concourantes, on peut trouver leur résultante par des applications successives de la règle précédente (*fig.* 7, II et légende).

Inversement, étant donnée une force F, on peut toujours la remplacer par deux autres **f** et **f'** ayant même point d'application que la première et dont les directions sont parallèles à deux directions données D et D'.

Un exemple de ce problème inverse nous est fourni par un corps reposant sur un plan incliné (*fig.* 8). Le poids du corps, force verticale représentée par la flèche **GE** appliquée au centre de gravité **G**, peut être décomposé en deux autres forces, l'une **GH** perpendiculaire à **AB** tendant à appliquer le corps sur le plan incliné et qui est annulée par la résistance de ce plan, l'autre **GI** = **f** qui tend à le faire glisser ou rouler sur **AB**.

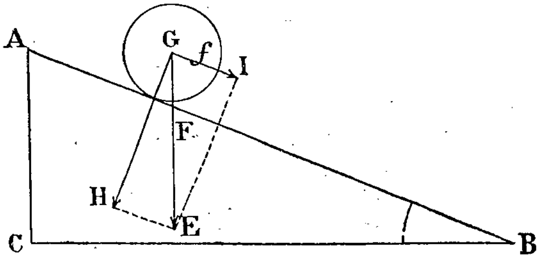

Fig. 8. — Le poids du corps **F** peut se décomposer en deux forces, l'une **GH** annulée par la résistance du plan, l'autre **GI** = **f** *plus petite* que **F** qui entraîne le corps dans la direction **AB**.

Pour trouver la longueur des droites représentant la valeur de ces composantes, il suffit de mener par G les droites GH et GI respectivement perpendiculaire et parallèle à AB et de tracer par l'extrémité E la parallèle à chacune de ces droites.

Il est intéressant de chercher le rapport qui lie la force f à la force F. Or on démontre facilement que les deux triangles rectangles ACB et GIE sont semblables, d'où on tire que :

$$\frac{GI}{GE} = \frac{AC}{AB} \text{ ou } \frac{f}{F} = \frac{AC}{AB},$$

d'où

$$f = F \times \frac{AC}{BA};$$

ainsi f est une fraction du poids F qui a pour numérateur la hauteur AC du plan et sa longueur AB pour dénominateur. Or on sait que cette fraction est le sinus de l'angle ABC[1]. On peut donc rendre la force f aussi petite qu'on veut en diminuant l'angle ABC.

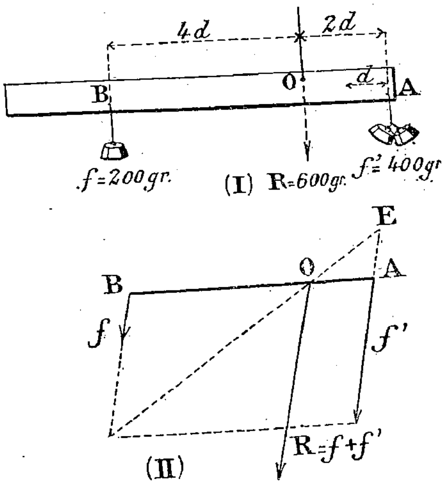

Fig. 9. — I. La force f = 200 grammes équilibre une force double f' = 400 grammes; mais la distance BO est le double de celle du bras de fléau AO. — II. La résultante R des deux forces parallèles f et f' et de même sens leur est parallèle et est égale à leur somme :

$$R = f + f' \quad \text{et} \quad \frac{f}{f'} = \frac{OA}{OB}.$$

6. Forces parallèles et de même sens.

Un exemple de l'action de deux forces parallèles et de même sens nous est fourni par la balance romaine étudiée en première année (*fig.* 9, I).

(1) Voir *Cours de Géométrie.*

Les poids appliqués en A et B représentent deux forces de 400 grammes et de 200 grammes ayant même sens. Puisque le système est en équilibre quand il est soutenu en O, c'est que la résultante de ces forces passe par ce point; or le point O partage la droite AB en deux parties inégales $OB = 2.OA$ et, d'autre part, la force f' en A est le double de la force f en B et l'on a (Voir *Cours de 1re année*) :

$$\frac{OA}{OB} = \frac{f}{f'}.$$

CONCLUSION. — *Lorsque deux forces parallèles* **f** *et* **f'** *et de même sens agissent sur un corps* (*fig.* 9, II) :

1° *Leur résultante* R *leur est parallèle et égale à leur somme ;*

2° *Son point d'application* O *est sur la droite qui joint les points d'application* A *et* B *des deux forces composantes et la partage en parties inversement proportionnelles aux intensités de ces composantes.*

REMARQUE. — Lorsqu'il y a plus de deux composantes, leur résultante unique se trouve par des applications successives de la règle précédente.

7. Forces parallèles et de sens contraires.

Dans l'exemple précédent, puisque le système est en équilibre, nous pouvons tout aussi bien considérer que le corps est sollicité à la fois par deux forces parallèles et de sens contraires (*fig.* 10, I), l'une f de 200 grammes appliquée en B, l'autre F de 600 grammes appliquée en O et qu'une troisième force f' de 400 grammes suffit à équilibrer. Or le système conservera son équilibre si nous remplaçons les deux forces F et f par une force unique R s'exerçant en A, égale et opposée à la force f' qui y est appliquée. Dans ces conditions la force R est la résultante des deux forces de sens opposés **F** et **f** et son intensité est égale à la différence de leurs valeurs

$$400 \text{ grammes} = 600 \text{ grammes} - 200 \text{ grammes},$$

d'où la règle suivante :

Lorsque deux forces parallèles et de sens contraires **F** *et* **f** *agissent sur un corps :*

1° *Leur résultante* **R** *est de même sens que la plus grande* **F** *est égale à leur différence* $R = F - f$;

2° *Le point d'application* **O** *de cette résultante est sur le prolongement de la droite* **AB** *qui joint les deux points d'application des composantes, du côté de la plus grande, en un point qui divise cette droite en parties inversement proportionnelles à ces forces* (*fig.* 10, II).

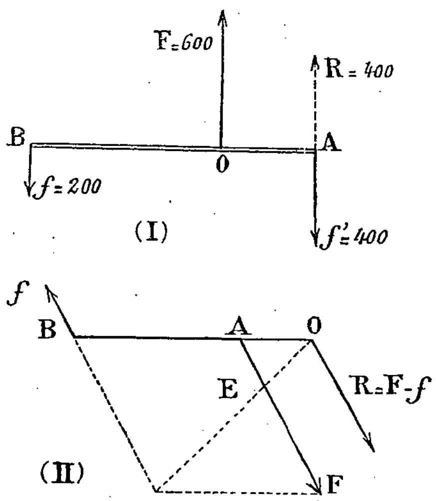

Fig. 10. — I. Les deux forces F et f peuvent être remplacées par une force unique R. — II. La résultante R de deux forces parallèles et de sens contraires F et f est égale à leur différence et est de même sens que la plus grande :

$$R = F - f, \qquad \frac{f}{F} = \frac{OA}{OB}.$$

8. Couple.

Dans le cas particulier où les deux forces parallèles et de sens contraire **f** et **f′** sont égales, la résultante est nulle. Le corps ne sera donc pas entraîné, mais s'il est mobile le seul effet des deux forces sera de le faire pivoter sur lui-même jusqu'à ce que la droite AB, qui joint leurs points d'application, soit dans la direction commune des deux forces. *L'ensemble de ces deux forces parallèles, égales et de sens contraires, constitue un* **couple.**

Nous aurons l'image d'un couple en tirant en sens inverses sur deux ficelles attachées aux deux extrémités d'une règle (*fig.* 11).

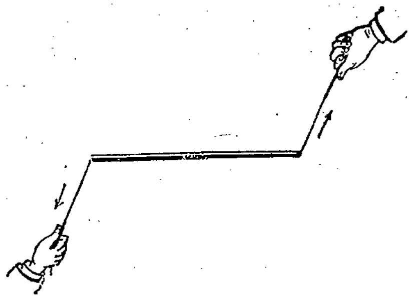

FIG. 11. — *Image d'un couple.* — La règle tirée à chacune de ses extrémités par deux forces égales, parallèles et de sens contraire pivote sur elle-même.

Application.— On peut fréquemment observer l'action de couples. Dans la rotation des roues d'une voiture par exemple (*fig.* 12) le cheval tire sur le timon et son effet est transmis à l'essieu suivant EF; d'autre part, les roues sont retenues en place par le frottement et, en leur point de contact, la force de frottement s'exerce suivant la direction GH parallèle à la direction EF et en sens opposé. Les forces EF et GH constituent un couple.

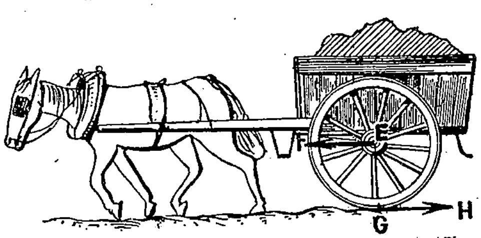

FIG. 12. — La roue d'une voiture tourne sous l'action du couple formé par les deux forces EF et GH.

On utilise les couples quand on veut enfoncer un tire-bouchon, une vrille, une tarière, quand on ouvre une porte avec un bouton, une fenêtre avec une crémone. On retrouve encore l'action d'un couple dans le treuil des puisatiers, etc. De même la rotation d'une aiguille aimantée autour de son pivot (§ 59) est due à un couple.

9. Expériences. — Réaliser les différentes expériences montrant l'inertie de la matière en mouvement. Emmancher un marteau et faire trouver l'explication du phénomène.

Montrer l'action de deux forces concourantes en faisant tirer une table par deux élèves à l'aide de deux cordes attachées à

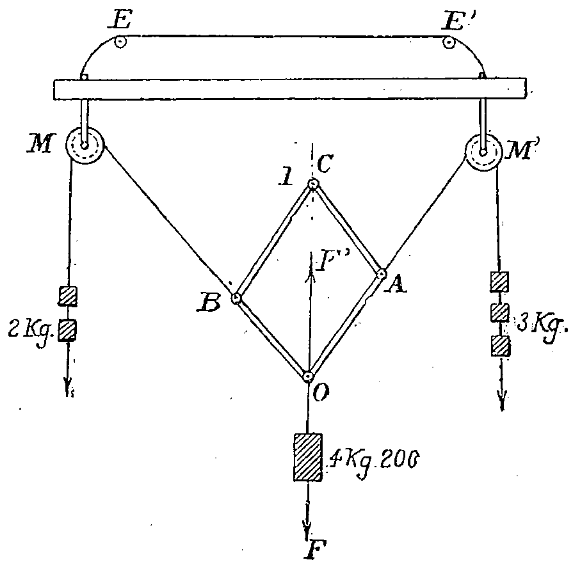

Fig. 12 *bis.*

un angle. Tracer à la craie sur le plancher deux lignes suivant la direction des cordes puis marquer le chemin parcouru par le pied de la table.

Vérifier la règle du parallélogrammes des forces à l'aide de l'appareil représenté (*fig.* 12 *bis*).

Vérifier la règle concernant les forces parallèles à l'aide d'une balance romaine construite simplement à l'aide d'une règle d'écolier.

Faire reconnaître l'action d'un couple dans la rotation d'une roue, d'un tire-bouchon, d'une porte tournant sur ses gonds, d'une serrure dont on tourne le bouton, d'une fenêtre à crémone, d'une manivelle de bicyclette, etc.

CHAPITRE II

MOUVEMENT UNIFORME
MOUVEMENT UNIFORMÉMENT VARIÉ

PLAN

I. — Mouvement uniforme.

C'est le mouvement d'un corps qui parcourt des espaces égaux en des temps égaux :

$$e = vt.$$

Un mobile soustrait à l'action de toute force est animé d'un mouvement uniforme.

II. — Mouvement uniformément varié.

Un exemple simple est offert par le mouvement d'un corps qui tombe.

1re série d'expériences : mesure des espaces parcourus	Loi des espaces	**Les *espaces* parcourus par un corps qui tombe sont proportionnels aux carrés des temps mis à les parcourir.**
	Conclusion	**Les espaces franchis pendant les secondes successives vont sans cesse en augmentant d'une même quantité par seconde. On dit que le mouvement est *uniformément accéléré*.**
2e série d'expériences : mesure des vitesses	Vitesse d'un mouvement uniformément accéléré	La vitesse, à un moment donné, d'un mouvement uniformément accéléré, est la vitesse du mouvement uniforme qui succède au mouvement varié, si l'on supprime à ce moment la force, cause de ce mouvement.
	Résultat	La vitesse du mouvement de chute d'un corps augmente d'une quantité constante g en des temps égaux. Cette quantité est appelée *accélération* du mouvement.
	Loi des vitesses	**Les vitesses sont proportionnelles aux temps employés à les acquérir.**
Formules générales	Vitesses : $v = gt$.	
	Espaces : $e = \frac{1}{2} gt^2$.	

MOUVEMENT UNIFORME

10. Mouvement uniforme.

En étudiant l'inertie des corps en mouvement, nous avons vu qu'une bille de verre lancée sur une surface horizontale roulera d'autant plus longtemps que la surface sera plus lisse et qu'en supposant que la bille pût rouler sur un plan indéfini dans le vide, elle ne s'arrêterait jamais. Dans ces conditions, aucune raison n'existant pour que la bille tourne d'un côté plutôt que de l'autre, elle se déplacerait en ligne droite et, comme il n'y a pas non plus de raison pour que son allure se précipite ou se ralentisse, elle franchirait régulièrement des espaces égaux en des temps égaux.

Lorsqu'un mobile parcourt ainsi des espaces égaux en des temps égaux, on dit que son mouvement est uniforme.

Dans un tel mouvement on définit **la vitesse du mobile, comme étant l'espace qu'il parcourt pendant une seconde** ; on l'exprime en *centimètres*. Si l'on appelle v cette vitesse, l'espace e parcouru en t secondes est :

$$e = v \times t.$$

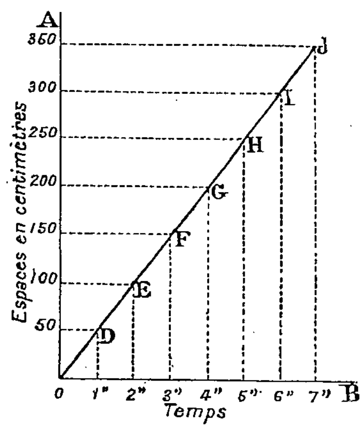

FIG. 13. — Graphique d'un mouvement uniforme.

C'est ainsi que dans l'exemple précédent, si la vitesse de la bille est de 50 centimètres, l'espace qu'elle aura franchi en une journée sera :

$$e = 50^{cm} \times (60 \times 60 \times 24).$$

11. Représentation graphique d'un mouvement uniforme.

Traçons deux droites rectangulaires OA, OB (*fig.* 13). Sur la première, portons des longueurs égales représentant chacune 50 centimètres et sur la deuxième des longueurs égales représentant des secondes. En déterminant les différent points D, E, F de la courbe correspondant aux espaces décrits par la bille précédente au bout de 1, 2, 3 secondes, nous trouvons que le mouvement d'un corps qui se déplace uniformément est représenté par une ligne droite.

REMARQUE. — Il convient de noter que ce graphigne se rapporte au mouvement lui-même et non pas à la trajectoire qui peut aussi bien être rectiligne que circulaire (cas d'un point pris sur la circonférence d'une roue).

MOUVEMENT UNIFORMÉMENT VARIÉ

12. Étude du mouvement d'un corps qui tombe.

Pour étudier un mouvement varié, nous considérerons celui d'un corps qui tombe et nous utiliserons comme ap-

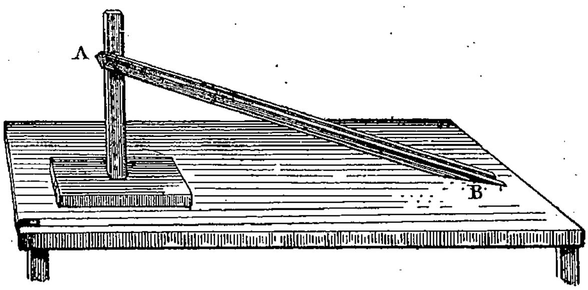

FIG. 14. — Etude d'un mouvement uniformément accéléré à l'aide du plan incliné.

pareil d'étude un plan incliné (§ 5) formé d'une longue barre en bois AB de $4^{m},80$, creusée dans sa longueur d'une rigole ou d'une rainure le long de laquelle nous aurons cloué bout à bout à partir de B des mètres en bois, ou collé simplement des bandes de papier divisées en centimètres (*fig.* 14). Un métronome battant la seconde nous servira à compter les temps.

L'appareil reposant sur le sol, soulevons l'extrémité A de 20 centimètres (*fig.* 15), alors le sinus de l'angle

ABC $= \frac{20}{480} = \frac{1}{24}$. Si nous prenons comme mobile une bille du poids de 72 grammes, celle-ci sera entraînée par une force de $\frac{72^{gr}}{24} = 3$ grammes (§ 5). Cherchons où il faut placer la bille pour qu'en l'abandonnant au commence-

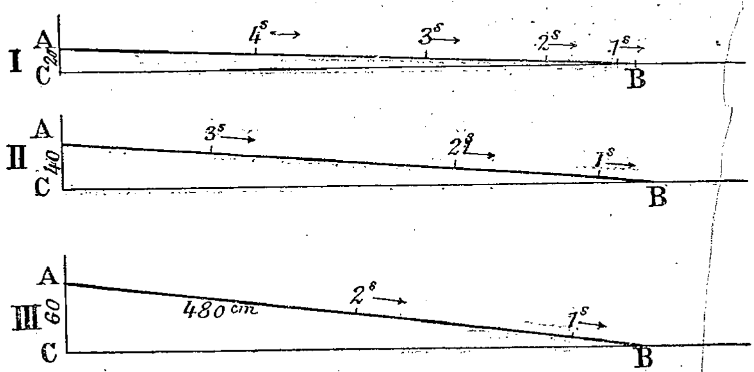

FIG. 15. — En I, le rapport $\frac{AC}{AB} = \frac{1}{24}$, la force agissante P′ est égale à $\frac{1}{24}$ du poids du corps; 1, 2, 3, 4, positions pour lesquelles la bille met 1^s, 2^s, 3^s, 4^s, pour arriver en B. En II, le rapport $\frac{AC}{AB} = \frac{2}{24}$, la force agissante est égale à 2P′. En III, le rapport $\frac{AC}{AB} = \frac{3}{24}$, la force agissante est égale à 3P′.

ment d'une seconde, elle vienne buter contre une règle placée en B au moment où l'on entend le battement suivant du métronome. Après une série de tâtonnements nous trouvons que l'espace parcouru pendant une seconde est d'environ 20 centimètres.

Recommençons l'expérience mais de manière que la bille arrive en B à la fin de la deuxième seconde; nous voyons qu'il faut placer la bille à 80 centimètres de B. Par deux autres expériences nous trouvons qu'au bout de 3, puis de 4 secondes, il faut placer la bille respectivement à 180 et à 320 centimètres.

Réunissons ces résultats en un tableau :

TABLEAU I. — **Force motrice = poids de 3 grammes**

Au bout de	1	*seconde, l'espace*	*franchi est*	20	*centimètres.*
—	2	—	—	80	—
—	3	—	—	180	—
—	4	—	—	320	—

Or ces nombres n'ont pas des valeurs quelconques; ils se succèdent suivant un ordre remarquable comme le montre le tableau suivant :

$$\begin{aligned} 20 &= 20 \times 1 = 20 \times 1^2 \\ 80 &= 20 \times 4 = 20 \times 2^2 \\ 180 &= 20 \times 9 = 20 \times 3^2 \\ 320 &= 20 \times 16 = 20 \times 4^2 \end{aligned}$$

Est-ce un résultat fortuit ou régulier ? Pour dégager ce qu'il y a de constant dans le phénomène, faisons varier la cause du mouvement, c'est-à-dire la force agissante. Par exemple, portons la hauteur AC à 40 centimètres (*fig.* 15, II), alors le sinus de l'angle ACB $= \frac{40}{480} = \frac{1}{12} = \frac{1}{24} \times 2$, sa valeur a *doublé*, il en est *de même de la force motrice.*

$$f = \frac{72}{12} = 3^{gr} \times 2.$$

La mesure des espaces, faite dans ces nouvelles conditions, nous donne les résultats suivants :

TABLEAU II. — **Force motrice = poids de 3 grammes × 2**

	Temps considérés.		Espaces franchis.
1^er^ RÉSULTAT :	1 *seconde*	....	$40^{cm} = 40 \times 1$
	2 —	....	$160^{cm} = 40 \times 2^2$
	3 —	....	$360^{cm} = 40 \times 3^2$

2^e^ Résultat : *L'espace franchi pendant la première seconde a doublé.*

Recommençons l'expérience en portant cette fois la hauteur AC à 60 centimètres (*fig.* 15, III). Le sinus de l'angle $ACB = \frac{60}{480} = \frac{1}{8} = \frac{1}{24} \times 3$. Sa valeur a *triplé; il en est de même de la force motrice :*

$$f = 3^{gr} \times 3.$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau III. — Force motrice = poids de 3 grammes × 3

	Temps considérés.	Espaces franchis.
1^er^ Résultat :	1 *seconde*	$60^{cm} = 60 \times 1$
	2 —	$240^{cm} = 60 \times 2^2$

2^e^ Résultat : *L'espace franchi pendant la première seconde a triplé.*

13. Généralisation des résultats. — Loi des espaces.

Ainsi, de l'ensemble des résultats recueillis, deux faits se dégagent avec netteté :

A. *Quand la force motrice devient* 2, 3 *fois plus grande, l'espace franchi pendant la première seconde devient aussi* 2, 3 *fois plus grand;*

B. *Les espaces parcourus par un corps qui tombe pendant* t *secondes sont égaux au produit de l'espace* e' *parcouru pendant la première seconde par le carré du nombre de secondes* t *:*

$$e = e' \times t^2.$$

A cause des dimensions restreintes de l'appareil, il n'est pas possible de poursuivre plus loin les expériences. Mais la constance des résultats obtenus nous autorise à les généraliser et à les appliquer au mouvement d'un corps tombant en chute libre.

Supposons donc qu'on augmente progressivement la hauteur AC, la valeur de la force motrice ira en augmentant jusqu'à ce que le plan incliné soit vertical. Alors la *bille tombera sous l'action de son* **propre poids**, c'est-à-dire en chute libre. L'angle **ABC** étant droit, son sinus est alors égal à **1**, c'est-à-dire qu'il est **24** fois plus grand que dans la première expérience, le *poids moteur est lui-même* **24** *fois plus grand* et, par suite (d'après la conclusion A), le *chemin parcouru pendant la première seconde sera également* **24** *fois plus grand*, soit :

$$20^{cm} \times 24 = 480 \text{ centimètres.}$$

En réalité, les nombres que nous avons obtenus sont tous un peu faibles à cause des frottements, de la résistance de l'air et de la difficulté à mesurer les longueurs avec exactitude ; aussi, au nombre $4^m,80$ substituerons-nous le nombre $4^m,90$, plus voisin de la valeur exacte.

Dans ces conditions, les espaces parcourus pendant **1**, **2**, **3**, **4**, ... *t* secondes seront (conclusion B) :

Temps considérés.		Espaces parcourus.
1 *seconde*	....	$4^m,90$
2 —	....	$4^m,90 \times 2^2$
3 —	....	$4^m,90 \times 3^2$
4 —	....	$4^m,90 \times 4^2$
...	....	.....
t —	....	$4^m,90 \times t^2$

L'expérimentation d'abord puis la **généralisation** des résultats acquis nous ont conduits à établir que le mouvement de la chute des corps suit une loi s'énonçant ainsi :

LOI DES ESPACES. — **Les espaces parcourus par un corps qui tombe librement dans le vide (1) sont proportionnels aux carrés des temps mis à les parcourir.**

La figure 16 représente la courbe des espaces.

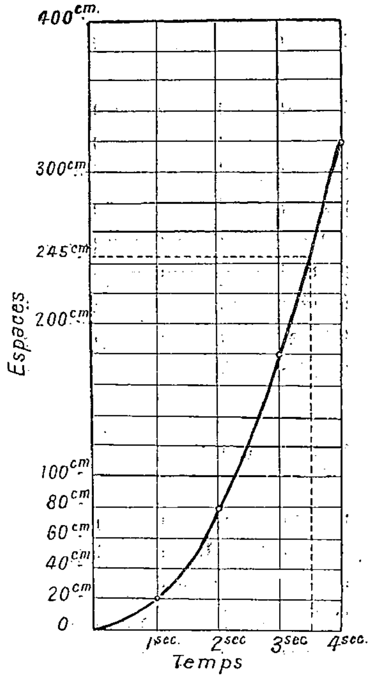

FIG. 16. — Graphique d'un mouvement uniformément accéléré.

14. Nature du mouvement de la chute d'un corps. — Mouvement uniformément varié.

Le tableau précédent permet de connaître l'*espace parcouru* pendant chacune des secondes successives par un corps qui tombe. On a les résultats suivants :

Secondes considérées.			Espaces parcourus.
1re *seconde*			$4^m,90$
2e	—	$4^m,90 \times 2^2 - 4^m,90$	$= 4^m,90 \times 3$
3e	—	$4^m,90 \times 3^2 - 4^m,90 \times 2^2$	$= 4^m,90 \times 5$
4e	—	$4^m,90 \times 4^2 - 4^m,90 \times 3^2$	$= 4^m,90 \times 7$
.....		.....	.....
.....		.....	.....

(1) On comprend que cette loi ne peut rigoureusement s'appliquer que si toute cause de perturbation est éliminée. Or, nous avons vu, à propos des aéroplanes (*Cours* de 2e année, § 37), que l'air oppose au mouvement une résistance qui croît comme le carré de la vitesse.

Augmentation *régulière* par seconde $= 4^m,90 \times 2 = 9^m,80$.

Ainsi les espaces franchis pendant les secondes successives vont en augmentant sans cesse d'une *quantité constante*. Le mouvement n'est donc pas uniforme (§ 10), on l'appelle **mouvement uniformément varié**.

Dans un tel mouvement, la vitesse s'accroît sans cesse, aussi ne saurait-il être question d'une vitesse unique comme pour le mouvement uniforme. En réalité, on ne peut jamais considérer que des vitesses particulières, celles que le mobile possède à des instants donnés.

Cela posé, on appelle vitesse d'un mouvement uniformément varié la vitesse du mouvement **uniforme** (§ 10) *qui succède à ce mouvement varié lorsqu'on supprime la force motrice qui en est la cause.*

15. Loi des vitesses.

A l'aide du plan incliné on peut déterminer les vitesses acquises au bout de 1, 2, 3, 4,... secondes, par un corps qui tombe. En effet quand la bille arrive au bas de la pente, si elle rencontre un plan horizontal, elle continue à se déplacer; cette fois son mouvement n'a plus lieu sous l'action de la pesanteur mais seulement en vertu de l'inertie de la matière, c'est-à-dire que ce mouvement est **uniforme**. La *longueur, comptée à partir de* B, *du chemin parcouru en* 1 *seconde sur ce plan horizontal mesure, par définition, la vitesse du mouvement uniformément varié au moment de la suppression de la force motrice.*

Ceci posé, reprenons l'expérience I ; portons la bille successivement aux divisions 20^{cm}, 80^{cm}, 180^{cm}, 320^{cm} (§ 12), et mesurons, dans chaque cas, l'espace qu'elle franchit en 1 seconde sur le plan horizontal à partir de B; nous trouvons 40^{cm}, 80^{cm}, 120^{cm}, 160^{cm}.

Faisons de même pour les expériences II et III, puis dressons un tableau des résultats obtenus :