

A. DESSART

J. JODOGNE

PHYSIQUE II

Quatorzième édition

Maison d'Édition A. DE BOECK - Bruxelles - 1962

COURS
Scheiβ DE
PHYSIQUE

PAR

A. DESSART

Docteur en Sciences

J. JODOGNE

Docteur en Sciences

TOME II

**OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE
ÉLECTRICITÉ
PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES
PHYSIQUE TERRESTRE**

Ouvrage couronné par l'Académie Royale de Belgique
(Prix De Keyn)

QUATORZIÈME ÉDITION
identique à la onzième
adoptée par le Conseil de Perfectionnement

BRUXELLES
MAISON D'ÉDITION A. DE BOECK
265, Rue Royale, 265

—
1962

Tous les exemplaires sont revêtus des signatures des auteurs.

A stylized handwritten signature consisting of several loops and a long, sweeping tail that curves upwards.A more complex handwritten signature with multiple overlapping loops and a sharp, pointed end.

TOUS DROITS RÉSERVÉS

SYMBOLES DES GRANDEURS

Optique.

<p>A angle de prisme <i>a</i> angle <i>c</i> vitesse de la lumière dans le vide γ grandissement D angle de déviation <i>d</i> distance de l'objet au miroir ou à la lentille <i>d'</i> distance de l'image au miroir ou à la lentille <i>f</i> distance focale</p>	<p>G grossissement <i>h</i> hauteur <i>i</i> angle d'incidence, grandeur de l'image <i>n</i> indice usuel de réfraction N indice absolu de réfraction <i>o</i> grandeur de l'objet P puissance R rayon de courbure <i>r</i> angle de réfraction V vitesse de la lumière</p>
---	--

Électricité.

<p><i>a</i> coefficient de température B induction magnétique C capacité électrique D déviation <i>d</i> distance Δ variation de E force électromotrice <i>E'</i> force contre-électromotrice <i>e</i> charge de l'électron ϵ constante diélectrique F force <i>F</i> flux électrique <i>F</i> flux magnétique <i>H</i> champ électrique <i>H</i> champ magnétique I intensité de courant L coefficient de self-induction <i>l</i> longueur <i>m</i> masse magnétique</p>	<p>μ coefficient de perméabilité magnétique P poids Q quantité de chaleur <i>Q</i> quantité d'électricité R résistance électrique <i>r</i> résistance électrique ρ résistivité <i>R^t</i> rendement S surface, section Σ somme de σ densité électrique <i>T</i> température <i>t</i> temps <i>T</i> travail, énergie U tension électrique V volume, potentiel <i>v</i> vitesse W puissance Z impédance</p>
---	---

Phénomènes périodiques.

<p><i>a</i> amplitude <i>e</i> élongation λ longueur d'onde <i>\nu</i> fréquence <i>p</i> pression</p>	<p><i>T</i> période <i>t</i> temps V vitesse de propagation φ angle de déphasage ω vitesse angulaire</p>
---	---

Les symboles affectés des indices *t*, *m*, *e* représentent respectivement des valeurs instantanées, des valeurs maxima ou minima, des valeurs efficaces des grandeurs qu'ils représentent.

SYMBOLES DES UNITÉS

Unités électriques.

Charge

C
mC
 μ C
Ah

coulomb
millicoulomb
microcoulomb
ampèreheure

Résistance

M Ω
 Ω
m Ω
 $\mu\Omega$

mégohm
ohm
milliohm
microhm

Tension

kV
V
mV
 μ V

kilovolt
volt
millivolt
microvolt

Energie

J
Wh
kWh

joule
wattheure
kilowattheure

Capacité

F
 μ F
pF

farad
microfarad
picofarad

Puissance

W
kW
ch

watt
kilowatt
cheval-vapeur

Intensité

A
mA
 μ A

ampère
milliampère
microampère

Self-induction

H

henry

Unités magnétiques.

Champ et induction magnétiques

Oe
Gs

oersted
gauss

Flux magnétique

Mx
Wb

maxwell
weber

Unités photométriques.

Intensité lumineuse

cd

candela

Eclaircement

lx

lux

Flux lumineux

lm

lumen

LIVRE V.

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.

CHAPITRE I.

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

1. **LUMIÈRE.** — L'Optique étudie les phénomènes produits par une énergie de forme spéciale : la lumière. La lumière est l'agent physique susceptible d'impressionner notre rétine.

Les questions de la nature intime de la lumière, de l'origine de la lumière, de l'action réciproque de la lumière et de la matière seront étudiées ultérieurement. Disons, dès maintenant, que la lumière est constituée de vibrations extrêmement rapides qui se propagent sous forme d'ondulations, analogues aux ondulations qui se produisent à la surface d'une eau tranquille lorsque nous y jetons un caillou. Notre œil n'est sensible qu'à un groupe de vibrations. Les vibrations trop lentes ou trop rapides n'affectent plus notre rétine; elles n'en possèdent pas moins la plupart des propriétés fondamentales que nous allons reconnaître à la lumière. Les lois que nous établirons en Optique s'appliquent, en réalité, à toute l'énergie qui se propage sous forme d'ondulations : rayonnement hertzien, rayonnement calorifique, rayonnement ultra-violet, rayonnement X.

2. **SOURCES DE LUMIÈRE.** — L'expérience journalière nous apprend que certains corps sont lumineux par eux-mêmes. Les **corps lumineux** par eux-mêmes constituent des sources de lumière; *exemples* : le Soleil, la flamme d'une bougie, le filament incandescent d'une lampe électrique. Les corps non lumineux par eux-mêmes ne sont visibles que lorsqu'ils sont éclairés. Ces **corps éclairés** renvoient la lumière qu'ils reçoivent; ils constituent indirectement des sources de lumière; *exemples* : la Lune, la craie, le banc.

3. **TRANSMISSION DE LA LUMIÈRE.** — Au point de vue de la transmission de la lumière, nous rangeons les corps en trois catégories : les corps transparents, les corps translucides, les corps opaques.

Les **corps transparents** se laissent traverser par la lumière et per-

mettent de percevoir nettement les objets; *exemples* : l'air, le verre, l'eau en couche mince.

Les **corps translucides** se laissent traverser par la lumière mais ne permettent pas de percevoir nettement les objets; *exemples* : le papier huilé, le verre dépoli, les vitres badigeonnées à la chaux.

Les **corps opaques** arrêtent la lumière; *exemples* : les métaux, la pierre, le bois.

Remarquons toutefois que la transparence et l'opacité sont des propriétés relatives qui dépendent de l'épaisseur des corps : une feuille d'or très mince laisse filtrer une lumière verte; la grande épaisseur d'eau rend obscures les profondeurs sous-marines.

4. PROPAGATION RECTILIGNE DE LA LUMIÈRE.

Expériences. — 1. Observons la lumière solaire qui, pénétrant dans une chambre obscure par une petite ouverture, éclaire les poussières en suspension dans l'air. Nous remarquons que le trajet lumineux est rectiligne.

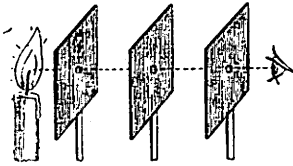


Fig. 1.

2. Interposons entre l'œil et la flamme d'une bougie trois écrans opaques percés chacun d'une petite ouverture (fig. 1). L'observateur ne perçoit la lumière que si la flamme de la bougie, les ouvertures des trois écrans et l'œil sont situés sur une même ligne droite.

Conclusion. — Puisque, dans la limite des expériences précédentes, l'air est un milieu homogène, nous pouvons énoncer le principe suivant : **Dans un milieu homogène, la lumière se propage en ligne droite.**

5. RAYONS LUMINEUX — FAISCEAUX LUMINEUX.

— La direction rectiligne le long de laquelle se propage la lumière dans un milieu homogène s'appelle **rayon lumineux**. Nous ne pouvons pas, physiquement, isoler un rayon lumineux; nous opérons dans nos expériences avec des **faisceaux lumineux**. Ces faisceaux lumineux groupent un nombre infini de rayons lumineux. Néanmoins, la considération du rayon lumineux comme construction géométrique est commode pour résoudre rapidement de nombreuses questions d'optique.

6. OMBRE ET PÉNOMBRE. — Un corps opaque, placé devant une source lumineuse, produit dans l'espace une région obscure appelée **ombre**.

Cas d'une source lumineuse punctiforme. — Dans une chambre obscure, plaçons un corps opaque A, de forme sphérique, devant une source lumineuse S réduite à un point (fig. 2). L'espace est partagé en deux régions:

la région éclairée et la région obscure limitées par la surface tronconique OTT'O' tangente à la sphère. Le passage de la région éclairée à la région obscure se fait sans transition.

Sur un écran, nous observons une surface obscure limitée par une circonférence ou par une ellipse suivant l'orientation de l'écran.

Cas d'une source lumineuse non punctiforme.

— Dans une chambre obscure, plaçons un corps opaque A de forme sphérique devant la flamme SS' d'une bougie (fig. 3). Le point lumineux S forme, en arrière du corps opaque, un cône d'ombre limité par les droites ST et SR. Le point lumineux S' forme en arrière du corps opaque un cône d'ombre limité par les droites S'T' et S'R'.

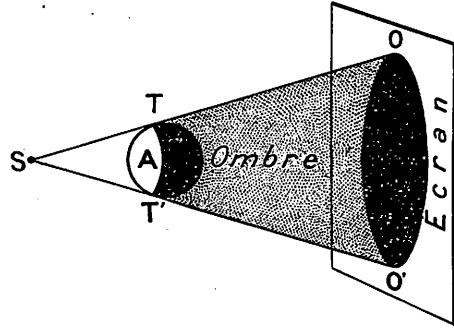


Fig. 2.

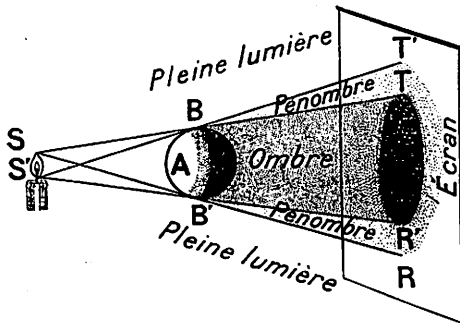


Fig. 3.

de la région d'ombre pure. La région limitée par la région d'ombre pure et par la région de pleine lumière constitue la région de pénombre.

Sur un écran, nous observons une région d'ombre pure séparée de la région de pleine lumière par une région de pénombre dans laquelle nous remarquons le passage graduel de l'ombre pure à la pleine lumière.

Si le corps opaque est plus volumineux que la source lumineuse, l'ombre pure est illimitée (fig. 3); si le corps opaque est moins volumineux que la source lumineuse, l'ombre pure est limitée mais la pénombre est illimitée (fig. 4).

Les points situés dans la région de l'espace extérieure aux deux cônes reçoivent la lumière de tous les points de la source lumineuse SS'. Cette région de l'espace est la région d'ombre pure.

Les points situés dans la région de l'espace extérieure aux deux cônes reçoivent la lumière de tous les points de la source lumineuse SS'. Cette région de l'espace est la région de pleine lumière.

Les points situés dans les régions T'BT et RB'R' de l'espace sont éclairés par une partie de la source lumineuse SS' d'autant plus grande que ces points sont plus éloignés

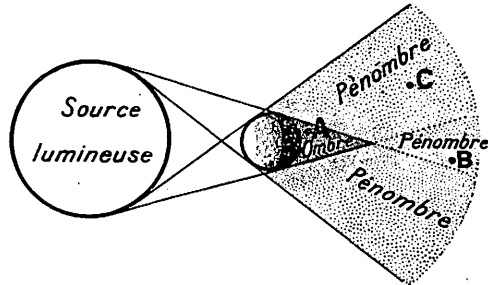


Fig. 4.

Pour un observateur placé dans la région d'ombre pure (au point A, par exemple), le corps lumineux est invisible; pour un observateur placé dans la pénombre en prolongement de l'ombre pure (au point B, par exemple), le corps lumineux apparaît sous la forme d'un anneau; pour un observateur placé dans l'autre partie de la pénombre (au point C, par exemple), le corps lumineux apparaît sous la forme d'un croissant.

Ces considérations expliquent les éclipses de Soleil et de Lune : il y a éclipse de Lune quand la Lune passe dans le cône d'ombre de la Terre; il y a éclipse de Soleil lorsque la Lune passant entre le Soleil et la Terre projette son cône d'ombre sur la Terre.

7. CHAMBRE NOIRE.

Expérience. — Les rayons lumineux issus de la flamme d'une bougie pénètrent dans une chambre noire par une très petite ouverture (fig. 5).

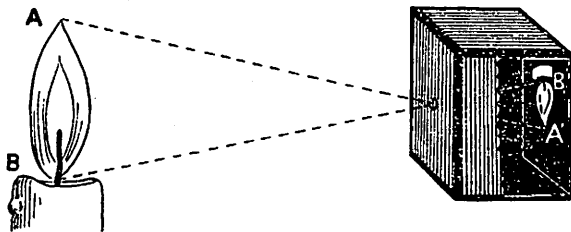


Fig. 5.

Sur le fond de la chambre se forme une image renversée, très nette de la flamme de la bougie. Cette image perd de sa netteté à mesure que l'ouverture de la chambre devient plus grande.

Explication. — Ce phénomène est explicable par la propagation rectiligne de la lumière. Le point A de la flamme est l'origine d'un faisceau lumineux qui pénètre par l'ouverture de la chambre noire et qui produit sur le fond de la chambre une petite tache lumineuse A'. De même, à chaque point de l'objet correspond sur l'écran une petite tache lumineuse. Si l'ouverture de la chambre noire n'est pas très petite, les diverses taches lumineuses empiètent les unes sur les autres : l'image manque de netteté. Si l'ouverture de la chambre noire est très petite, les taches lumineuses se réduisent sensiblement à des points lumineux : l'image est très nette.

8. APPLICATIONS. — L'éclairage direct par une petite surface lumineuse (filament incandescent) produit des ombres très tranchées qui fatiguent l'œil. Pour éviter cet effet sur l'œil, on entoure le filament incandescent d'une ampoule translucide (verre mat) qui adoucit les contours des ombres portées. On utilise de plus en plus des tubes lumineux dont la grande surface éclairante réalise un minimum d'ombres. Enfin l'éclairage indirect supprime radicalement les ombres et réalise un éclairage très doux, peu fatigant.

9. ACCIDENTS SUBIS PAR UN FAISCEAU LUMINEUX A LA SURFACE DE SÉPARATION DE DEUX MILIEUX TRANSPARENTS. — Lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur la surface de séparation de deux milieux homogènes transparents tels que l'air et l'eau, il se produit trois phénomènes (fig. 6).

Une partie du faisceau incident revient dans le premier milieu en suivant une direction déterminée : c'est le phénomène de **réflexion**.

Une partie du faisceau incident pénètre dans le second milieu en subissant à la surface de séparation des deux milieux un changement brusque de direction : c'est le phénomène de **réfraction**.

Enfin, une partie du faisceau incident revient dans le premier milieu suivant toutes les directions à partir de la surface de séparation des deux milieux : c'est le phénomène de **diffusion**.

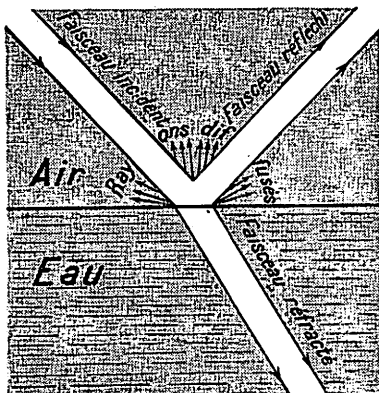


Fig. 6.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un homme, dont la taille est de 1,75 m, se dirige vers une lampe S suspendue à une hauteur h au-dessus du sol (fig. 7). Lorsque le promeneur se trouve au point B, l'ombre portée sur le sol horizontal est de 3 m. S'il avance de 1,5 m dans la direction de la source lumineuse, l'ombre portée n'est plus que de 2,25 m. Déterminer la hauteur h de la lampe au-dessus du sol.

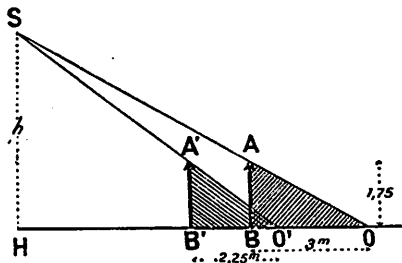


Fig. 7.

En résolvant le système des deux équations à deux inconnues, nous trouvons :

$$h = 5,25 \text{ m.}$$

SOLUTION. — La considération des triangles semblables AOB et SOH donne :

$$\frac{h}{1,75} = \frac{d + 3}{3}$$

La considération des triangles semblables A'O'B' et SO'H donne :

$$\frac{h}{1,75} = \frac{(d - 1,50) + 2,25}{2,25}$$

2. Un objet de 50 cm de hauteur se trouve à 2 m d'une chambre noire de 20 cm de profondeur. On demande : a) le diamètre D à donner à l'ouverture circulaire de la chambre noire pour qu'un point de l'objet donne une tache de 1/2 mm de diamètre; b) la grandeur de l'image obtenue dans la chambre.

SOLUTION. — a) La considération de l'étroit faisceau lumineux conique issu d'un point et limité à l'ouverture de la chambre donne :

$$\frac{D}{200} = \frac{0,05}{220}; \quad D = 0,045 \text{ cm.}$$

Le diamètre de l'ouverture circulaire doit être de 0,45 mm.

b)
$$\frac{i}{50} = \frac{20}{200}; \quad i = 5 \text{ cm.}$$

L'image, en tenant compte du fait qu'un point donne une tache de 1/2 mm de diamètre, est donc de 5,05 cm.

EXERCICES NUMÉRIQUES

1. L'ombre projetée par une haute colonne est de 11 m lorsque l'ombre projetée par un mur voisin de 2 m orienté identiquement par rapport au soleil est de 40 cm. Déterminer la hauteur de la colonne. R : 55 m.

2. Entre une fente lumineuse verticale de 3 cm de longueur (largeur négligeable) et un écran parallèle à la fente, on place une bande opaque horizontale de 2 cm de large, la bande étant disposée parallèlement à l'écran. La distance de l'écran à la fente lumineuse est de 3 m. a) Quelle doit être la distance de l'écran à la bande opaque pour que l'ombre portée sur l'écran soit nulle? b) Quelle est, dans ces conditions, la largeur de la pénombre? c) A quelle distance doit-on placer la bande opaque par rapport à l'écran pour obtenir sur l'écran une ombre portée de 1 cm de largeur? R : a) 2 m; b) 12 cm; c) 1,5 m.

3. On éclaire un carré opaque de 10 cm de côté par une source ponctuelle placée à une distance d sur la perpendiculaire élevée au milieu du carré. Parallèlement au carré, on dispose un écran à une distance d' du carré. a) Déterminer la forme et les dimensions de l'ombre portée. b) Déterminer l'aspect de l'ombre et de la pénombre sur l'écran lorsqu'on remplace la source ponctuelle par une fente rectiligne parallèle et égale à un des côtés du carré sachant que le milieu de la fente coïncide avec le point occupé par la source ponctuelle et que le carré est placé à mi-distance de la source et de l'écran. R : a) Ombre carrée de $10 \left(\frac{d+d'}{d} \right)$ cm de côté; b) Ombre rectangulaire dont la longueur est de $10 \left(\frac{d+d'}{d} \right)$ cm et dont la largeur est de 10 cm. Pénombre : bande de 10 cm de largeur bordant les longueurs du rectangle.

CHAPITRE II.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

§ 1. LOIS DE LA RÉFLEXION.

10. DISQUE OPTIQUE. — Le disque optique est un appareil

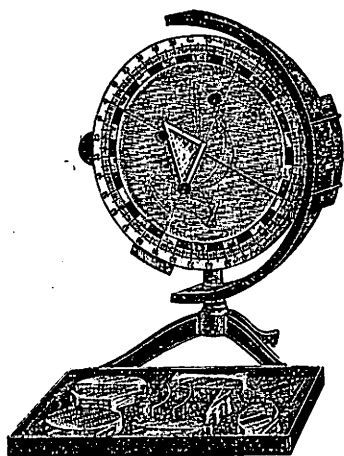


Fig. 8.

simple qui se prête très bien à la démonstration des principales lois de l'Optique (fig. 8). Il se compose d'un disque partagé en quatre secteurs égaux, gradués de 0° à 90° . Sur ce disque peuvent se visser divers accessoires : miroirs, prismes, lentilles, ... Un large écran semi-cylindrique, percé de fentes, peut se déplacer à la périphérie du disque. Ces fentes isolent des faisceaux lumineux provenant du soleil ou d'une lampe d'un appareil de projection. Ces faisceaux lumineux se marquent sur le disque par des traces lumineuses très visibles. La rotation de l'écran déplace les faisceaux parallèlement à eux-mêmes; la rotation du disque modifie la position des objets fixés sur le disque par rapport aux faisceaux lumineux.

11. BANC D'OPTIQUE. — Le banc d'optique est constitué d'un rail gradué le long duquel glissent des montures portant des accessoires: miroirs, prismes, lentilles, sources lumineuses, écrans,... (fig. 9). Le banc d'optique permet de réaliser commodément les expériences d'optique en disposant à volonté : source lumineuse, instrument étudié et écran. La plupart de nos expériences décrites

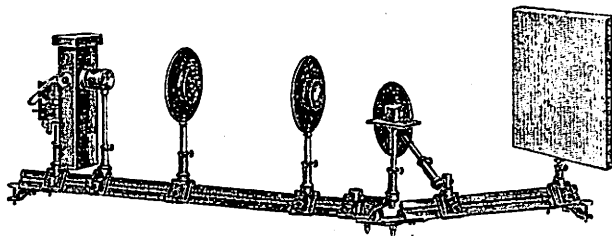


Fig. 9.

avec le disque optique peuvent être réalisées avec le banc d'optique.

X 12. LOIS DE LA RÉFLEXION.

Expériences. — Fixons, selon un des diamètres du disque optique, un petit miroir plan constitué par une surface métallique parfaitement polie. Le miroir réfléchit presque intégralement la lumière incidente. Le rayon lumineux qui passe par la fente découverte sur l'écran tombe au centre I du miroir plan où il subit la réflexion (fig. 10). Le rayon incident et le rayon réfléchi se marquent sur le disque par les traces lumineuses respectives SI et IR. La normale au miroir au point d'incidence est représentée par le diamètre IN. Lisons sur le disque les valeurs de l'angle d'incidence i (angle formé par le rayon incident avec la normale au miroir au point d'incidence) et de l'angle de réflexion i' (angle formé par le rayon réfléchi avec la normale au miroir au point d'incidence). Multiplions les expériences. Les résultats de nos mesures nous permettent d'énoncer les lois de la réflexion.

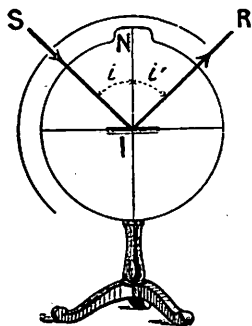


Fig. 10.

Lois de la réflexion. — Première loi. — Le rayon incident, la normale au miroir au point d'incidence et le rayon réfléchi sont situés dans un même plan.

Deuxième loi. — L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux.

$$i = i'$$

§ 2. MIROIRS PLANS.

13. MIROIRS. — Toute surface qui réfléchit une fraction importante de la lumière incidente est un miroir. Une surface métallique parfaitement polie est un miroir. Toutefois les surfaces métal-

liques sont rapidement altérées par l'action de l'oxygène et de la vapeur d'eau. Aussi protège-t-on la surface métallique réfléchissante au moyen d'une lame de verre transparente. Pour obtenir un miroir, on métallise la surface polie d'une lame de verre en la recouvrant d'une légère couche d'étain amalgamé (étamage) ou d'argent métallique (argenteure).

X 14. IMAGE D'UN POINT RÉEL.

Expérience. — Disposons une source lumineuse punctiforme S devant un miroir plan M (fig. 11) : nous observons, au delà du miroir une image S' du point S .

Explication. — Considérons un rayon lumineux SI qui,

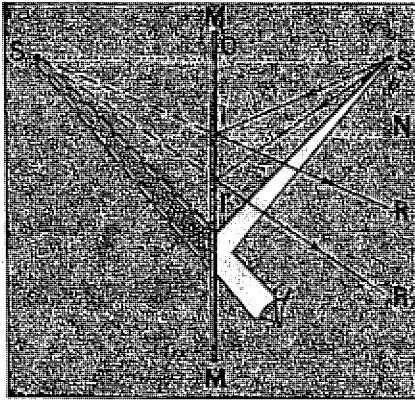


Fig. 11.

rencontrant le miroir M au point I , se réfléchit suivant IR . Prolongeons le rayon réfléchi IR en arrière du miroir. Abaissons la perpendiculaire SO au miroir et prolongeons-la jusqu'à sa rencontre S' avec le prolongement du rayon réfléchi IR . Les triangles rectangles SOI et $S'OI$ sont égaux puisqu'ils ont le côté OI commun et les angles en I égaux. Donc, SO est égal à $S'O$. Le point S' est le symétrique du point S par rapport au miroir.

La même explication peut être donnée pour le rayon SI' qui, rencontrant le miroir M au point I' , se réfléchit suivant $I'R'$; elle peut être donnée pour tous les rayons issus du point S .

Image virtuelle. — Le point S' est le point de concours des prolongements des rayons lumineux. L'œil qui reçoit les rayons réfléchis par le miroir M a l'illusion que ces rayons sont issus du point S' . Le point S' constitue une **image virtuelle**.

Une image virtuelle ne peut être reçue sur un écran : elle est une illusion d'optique.

15. IMAGE D'UN POINT VIRTUEL.

Expérience. — Disposons sur le trajet des rayons solaires une lentille convergente L : nous obtenons une image S que nous pouvons recevoir sur l'écran E (fig. 12). Interposons un miroir plan M entre la lentille L et l'écran E : nous obtenons une image S' sur l'écran E' placé en avant du miroir.

Explication. — Les rayons lumineux AI et BI' sortant de la lentille ne peuvent plus, par suite de l'interposition du miroir plan M, former l'image S; ils se réfléchissent respectivement suivant IS' et I'S'; ils fournissent l'image S'.

Image réelle. — L'image S', point de concours de rayons lumineux, peut être reçue sur un écran : elle constitue une **image réelle**.

L'image réelle S joue le rôle d'un objet virtuel.

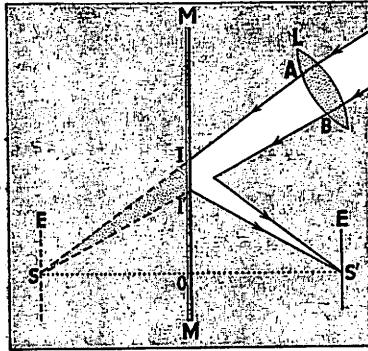


Fig. 12

16. IMAGE D'UN OBJET. — Un objet AB peut être considéré comme un ensemble de points. Le miroir plan donne de chacun de ces points objets un point image symétrique par rapport au miroir. L'ensemble A'B' des points images constitue l'image de l'objet AB (fig. 13).

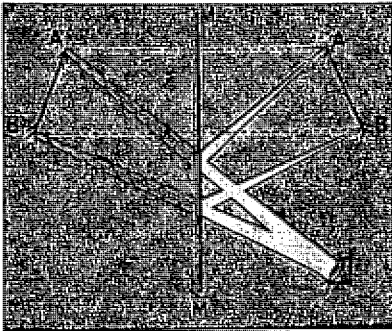


Fig. 13.

Un miroir plan donne :

- d'un objet réel une image virtuelle, égale en grandeur à l'objet;

- d'un objet virtuel une image réelle, égale en grandeur à l'objet.

Cependant, l'image n'est pas superposable à l'objet; elle lui est **symétrique** par rapport au miroir; l'image d'une main droite formée par un miroir plan est une main gauche.

17. IMAGES DONNÉES PAR LES MIROIRS PLANS ANGULAIRES. — Considérons un objet lumineux S, disposé entre deux miroirs plans M et M' faisant entre eux un angle de 60° (fig. 14). Le miroir M donne de l'objet lumineux S une image S₁. Le miroir M' donne de l'image S₁ une image S₂. Le miroir M donne de l'image S₂ une image S₃. Le miroir M' donne de l'objet lumineux S une image S'. Le miroir M donne de l'image S' une image S''. Le miroir M' donne de l'image S'' une image S''' qui se confond avec l'image S₃. Nous obtenons donc cinq images de l'objet lumineux S : trois images symétriques de l'objet : S₁, S', S''' (ou S₃) et

deux images semblables à l'objet : S_2 et S'' . Si nous assimilons

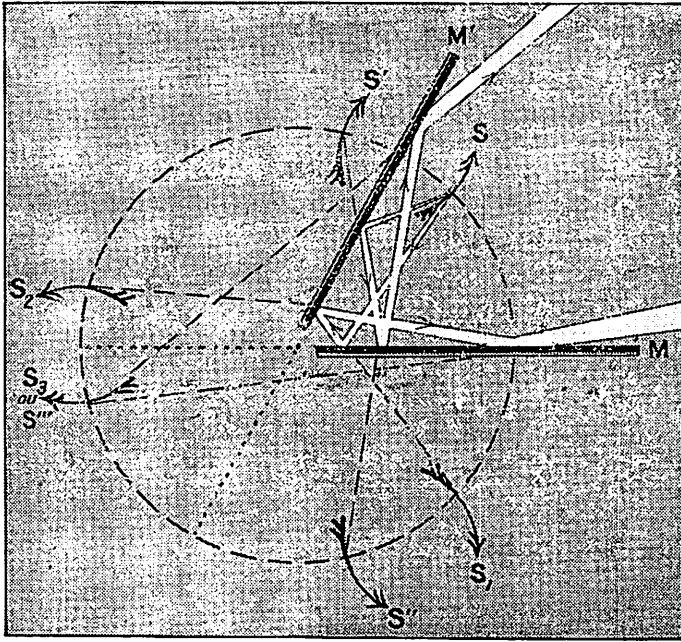


Fig. 14.

l'objet à une image, nous avons deux groupes de trois images sem-

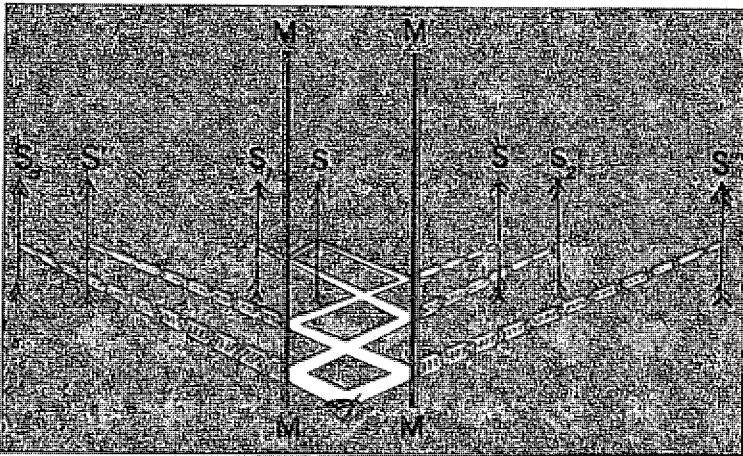


Fig. 15.

blables. Nous avons, par conséquent, six images c'est-à-dire un nombre d'images égal au quotient de 360° par 60° .

D'une façon générale, le nombre N d'images données par des miroirs plans angulaires faisant entre eux un angle a est donné par la relation :

$$N = \frac{360}{a}$$

Le nombre d'images données par des miroirs plans angulaires croît donc en raison inverse de l'angle que font entre eux les deux miroirs. Si cet angle devient nul (miroirs parallèles), le nombre d'images est théoriquement illimité (fig. 15).

18. IMAGES MULTIPLES DONNÉES PAR LES MIROIRS ÉTAMÉS ET ARGENTÉS. —

Lorsque, placés obliquement devant un miroir étamé ou argenté, nous observons attentivement l'image de la flamme d'une bougie, nous voyons une série d'images dont la seconde est la plus brillante (fig. 16). Ce fait provient de ce que le miroir présente deux surfaces réfléchissantes. En effet, considérons le rayon SI_1 issu d'un des points lumineux. Une faible partie de la lumière incidente se réfléchit en I_1 sur la surface antérieure du miroir : l'œil voit une image très pâle S_1 . Une notable partie de la lumière incidente pénètre en I_1 dans le verre et se réfléchit en I_2 sur la surface postérieure du miroir. Une grande partie de la lumière réfléchie sort en I' du verre : l'œil voit une image brillante S_2 . Une petite partie de la lumière réfléchie se réfléchit en I' sur la face antérieure du miroir, se réfléchit à nouveau en I_3 sur la face postérieure du miroir et sort, en partie, en I'' du verre : l'œil voit une image très pâle S_3 et ainsi de suite.

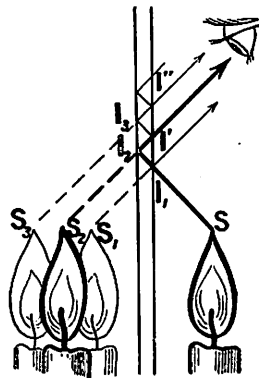


Fig. 16.

19. MIROIR TOURNANT. —

Considérons un rayon SI qui se réfléchit au centre d'un miroir plan (fig. 17). Si le miroir tourne d'un angle a autour du point I , le rayon réfléchi tourne d'un angle $2a$. En effet, les lois de la réflexion nous donnent :

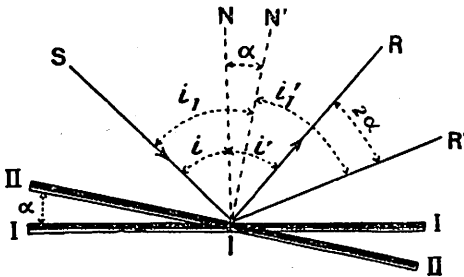


Fig. 17.

position I du miroir :

$$i = i' \quad (1)$$

position II du miroir :

$$i_1 = i'_1 \quad (2)$$

Or, $i_1 = i + a$
 et $i'_1 = i' - a + RIR'$

Remplaçons dans la relation (2) i_1 et i'_1 par leurs valeurs respectives, nous avons :

$$i + a = i' - a + RIR'$$

$$RIR' = 2a.$$

20. APPLICATIONS DES MIROIRS PLANS. — Les miroirs plans sont utilisés comme glaces d'appartement et de toilette, comme rétro-viseurs, comme réflecteurs. Ils entrent dans la fabrication de nombreux appareils de physique (périscope à miroirs, sextant,...).

Les combinaisons de miroirs parallèles et angulaires sont employées pour obtenir, dans les salles, de remarquables illusions d'optique.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un miroir circulaire de 5 cm de diamètre est placé face à un mur vertical distant de 2 m. Quel est le diamètre D de la partie circulaire du mur aperçue dans le miroir par l'œil d'un observateur qui se trouve à 25 cm du miroir sur la perpendiculaire élevée au centre du miroir ? Comment varie le diamètre D en fonction de la distance d de l'observateur au miroir et du diamètre D' de ce dernier ?

SOLUTION. — De l'œil de l'observateur, menons les rayons OI et OI' sur les bords du miroir (fig. 18). Ces rayons sont issus, après réflexion, des rayons SI et $S'I'$. Les rayons SI et $S'I'$ délimitent le champ du miroir. La considération des triangles semblables $IO'I'$ et $SO'S'$ donne :

$$\frac{D}{5} = \frac{225}{25}; \quad D = 45 \text{ cm.}$$

La relation qui unit le diamètre de la partie circulaire du mur vue dans le miroir en fonction de la distance d de l'observateur au miroir et du diamètre D' de ce miroir est :

$$\frac{D}{D'} = \frac{200 + d}{d}; \quad D = \left(\frac{200 + d}{d} \right) D'$$

2. On veut obtenir 11 images d'un objet situé entre des miroirs plans angulaires. a) Quel est l'angle que doivent faire ces miroirs ? b) Quelles sont les propriétés des images ?

SOLUTION. — a) $N = \frac{360}{\alpha} = 12; \quad \alpha = 30^\circ$

b) 5 images semblables à l'objet et 6 images symétriques de l'objet.

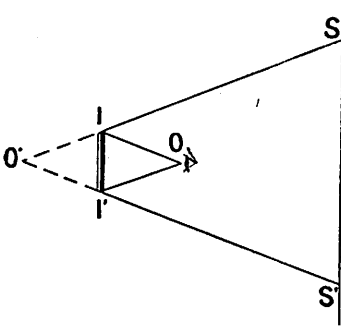


Fig. 18.

§ 3. MIROIRS SPHÉRIQUES.

21. DÉFINITIONS. — Un miroir sphérique est une surface réfléchissante dont la forme est une calotte sphérique (fig. 19).

Nous appellerons : **centre de courbure**, le centre C de la sphère dont fait partie la calotte sphérique; **rayon de courbure**, le rayon R de cette sphère; **base du miroir**, le cercle qui limite le miroir; **axe principal**, la perpendiculaire menée du centre de courbure à la base du miroir; **sommet du**

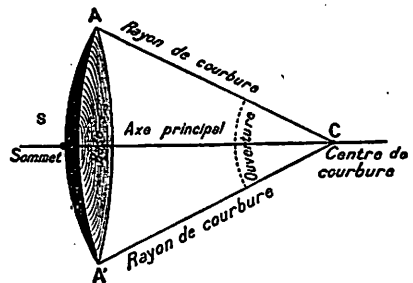


Fig. 19.

miroir, le point de rencontre O de l'axe principal avec le miroir; **section principale**, tout plan qui passe par l'axe principal; **angle d'ouverture**, l'angle ACA' formé par les rayons joignant le centre de courbure aux extrémités d'un diamètre de la base du miroir.

Le **miroir** est **concave** ou **convexe** selon que la surface réfléchissante est la face intérieure ou la face extérieure de la calotte sphérique.

La réflexion d'un rayon lumineux sur un miroir sphérique suit les lois ordinaires de la réflexion, la normale au miroir au point d'incidence étant le rayon de la sphère passant par ce point. Il en résulte qu'un rayon lumineux se propageant dans une section principale du miroir reste, après réflexion, dans la même section principale puisque cette section comprend la normale au miroir au point d'incidence. Il suffira donc de déterminer ce qui se passe dans une section principale pour savoir ce qui se passe dans toutes les sections principales du miroir.

Les propriétés des miroirs sphériques ne sont simples que si on considère des **miroirs sphériques de faible ouverture** (10° à 15°) et des **rayons lumineux faiblement inclinés sur l'axe principal du miroir**. Nous supposons que ces conditions sont toujours réalisées.

22. PROPRIÉTÉ DU CENTRE DE COURBURE.

Expériences. — Faisons tomber sur un miroir concave, fixé sur le disque optique, un rayon lumineux passant par le centre de courbure C : nous observons que le rayon réfléchi se confond avec le rayon incident (fig. 20).

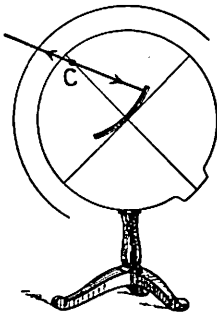


Fig. 20.

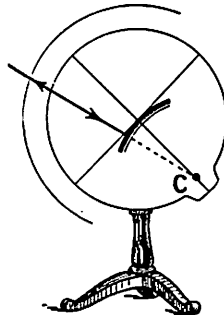


Fig. 21.

Recommençons la même expérience avec un miroir convexe, le rayon lumineux, dont le prolongement passe par le centre de courbure C , se réfléchit sur lui-même (fig. 21).

Conclusion. — Tout rayon lumineux passant réellement ou virtuellement par le centre de courbure d'un miroir sphérique se réfléchit sur lui-même.

•**Étude analytique.** — Dans les miroirs sphériques, tout rayon lumineux passant, réellement ou virtuellement, par le centre de courbure est dirigé suivant la normale au miroir au point d'incidence. L'angle d'incidence étant nul, l'angle de réflexion l'est également : le rayon se réfléchit donc sur lui-même.

23 PROPRIÉTÉ DU FOYER.

Expériences. — Faisons tomber sur un miroir concave, fixé sur le disque optique, une série de trois rayons lumineux parallèles à l'axe principal ; nous voyons les rayons réfléchis converger en un point F que nous appelons foyer (fig. 22). Nous observons également que le foyer, qui est réel, est situé au milieu du segment de droite joignant le sommet du miroir au centre de courbure.

Recommençons la même expérience avec un miroir convexe. Nous obser-

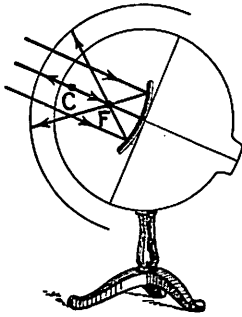


Fig. 22.

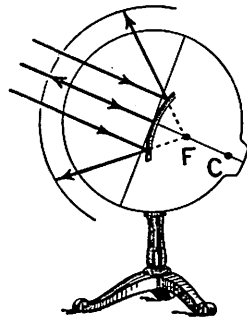


Fig. 23.

vons que les rayons lumineux divergent, après réflexion, d'un point F qui constitue un foyer virtuel (fig. 23) ; ce foyer est situé au milieu de la droite joignant le sommet du miroir au centre de courbure.

Conclusion. — Tout rayon lumineux parallèle à l'axe principal d'un miroir sphérique se réfléchit en passant réellement ou virtuellement par le foyer.

Le foyer est situé sur l'axe principal sensiblement à égale distance du sommet et du centre de courbure.

Si un rayon incident parallèle à l'axe principal d'un miroir sphérique se réfléchit en passant réellement ou virtuellement par le foyer, réciproquement un rayon incident passant réellement ou virtuellement par le foyer d'un miroir sphérique se réfléchit parallèlement à l'axe principal. Cette proposition découle de l'égalité des angles d'incidence et de réflexion.

Remarque. — Des rayons lumineux parallèles légèrement inclinés sur l'axe principal convergent, après réflexion sur un miroir sphérique, réellement ou virtuellement en un point appelé **foyer secondaire**.

***Étude analytique.** — Considérons le rayon incident SI parallèle à l'axe principal du miroir concave M et le rayon réfléchi IR (fig. 24). Le rayon réfléchi IR rencontre l'axe principal OC en un point F situé sensiblement à égale distance du point O et du point C. En effet, le triangle IFC est isocèle puisque les angles α et i' sont égaux car $i = i'$ (angles d'incidence et de réflexion) et $i = \alpha$ (alternes-internes). Donc, le segment IF est égal au segment FC. Mais, puisque l'angle d'ouverture du miroir est petit, le segment IF est sensiblement égal au segment OF. Par conséquent, le segment FC est sensiblement égal au segment OF. Le point F est donc situé à égale distance du sommet et du centre de courbure du miroir.

La même démonstration s'applique à tout autre rayon incident : le rayon incident S'I', par exemple, donne, après réflexion, le rayon I'R' qui coupe l'axe principal au même point F.

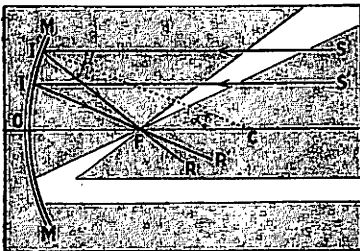


Fig. 24.

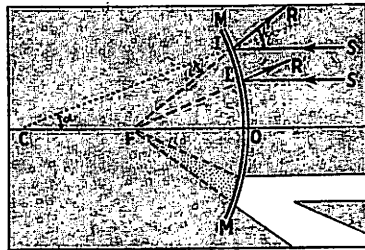


Fig. 25

Il résulte de cette démonstration qu'un faisceau lumineux parallèle à l'axe principal converge, après réflexion sur un miroir concave, au foyer.

La distance OF du foyer au miroir, que nous désignerons par la lettre f , est appelée **distance focale** du miroir. Puisque OF est égal à la moitié de OC c'est-à-dire à la moitié du rayon de courbure, nous avons :

$$f = \frac{R}{2}$$

La démonstration précédente s'applique aux miroirs convexes en considérant que ce sont les prolongements des rayons réfléchis qui convergent au foyer (fig. 25). Remarquons qu'un faisceau parallèle à l'axe principal devient, après réflexion, un faisceau conique divergent dont le sommet se trouverait au foyer.

24. CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE L'IMAGE D'UN POINT. — Soit à construire l'image d'un point A donnée par un miroir concave (fig. 26). Le rayon AI parallèle à l'axe principal

passé après réflexion par le point F; l'image du point A est sur le rayon réfléchi IR. Le rayon AI' passant par le centre de courbure C se réfléchit sur lui-même; l'image du point A est sur le rayon réfléchi I'A. Le point A', à l'intersection des rayons réfléchis IR et I'A, est l'image du point A.

Le point A' est bien l'image du point A. En effet, tout autre rayon issu du point A passe, après réflexion sur le miroir concave, par le point A' :

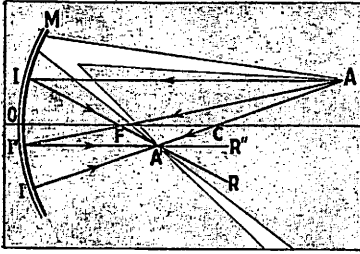


Fig. 26.

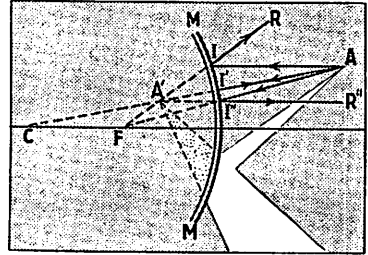


Fig. 27.

le rayon AI'' passant par le foyer F, par exemple, se réfléchit parallèlement à l'axe principal, le rayon réfléchi I''R'' rencontre le point A'...

La construction géométrique de l'image d'un point formée par un miroir convexe est identique à la construction géométrique de l'image d'un point formée par un miroir concave en remarquant toutefois que ce sont les prolongements des rayons qui convergent au point image (fig. 27).

25. CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE L'IMAGE D'UN OBJET. — Un objet peut être considéré comme constitué d'un ensemble de points. L'image de cet objet donnée par un miroir sphérique est le lieu géométrique des images des points qui consti-

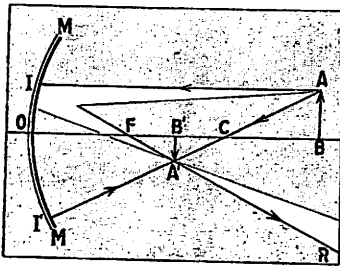


Fig. 28.

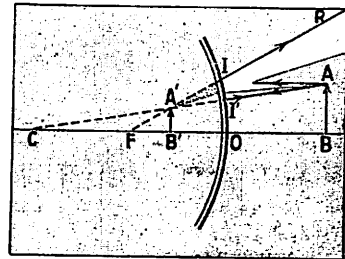


Fig. 29.

tuent l'objet. Soit à construire l'image de la flèche AB perpendiculaire à l'axe principal d'un miroir sphérique (fig. 28 et 29). Nous construisons l'image A' du point A et nous obtenons l'image B' du point B en abaissant la perpendiculaire A'B' sur l'axe principal. L'image de la flèche AB est la flèche A'B'.

26. IMAGES FORMÉES PAR LES MIROIRS SPHÉRIQUES.

Construction géométrique. — Nous pouvons étudier, par la construction géométrique, les variations de position et de grandeur de l'image d'un objet qui se déplace devant un miroir sphérique. Lorsque l'objet se déplace de l'infini jusqu'au miroir, remarquons que, pour toute position de l'objet, la direction du rayon parallèle à l'axe principal ne change pas tandis que la direction du rayon passant par le centre de courbure change constamment. Il en résulte qu'il y a, pour toute position de l'objet, une image correspondante. Nous remarquons (fig. 30 et 31) :

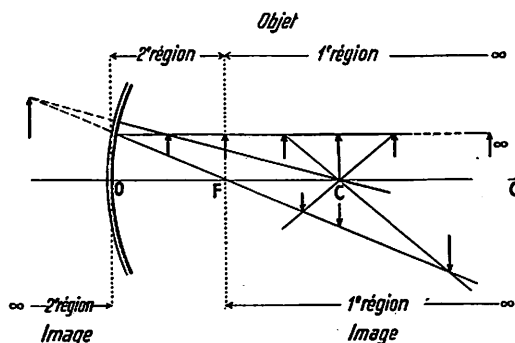


Fig. 30.

Lorsque l'objet se déplace de l'infini au foyer d'un **miroir concave**, l'image, réelle, se déplace du foyer à l'infini (1^{re} région).

Lorsque l'objet se déplace du foyer au miroir, l'image, virtuelle, se déplace de l'infini au miroir (2^e région).

Nous donnons au n° 28 une méthode graphique permettant de retrouver facilement la position et les propriétés des images que nous fournit la construction géométrique.

Vérification expérimentale. — Nous vérifions aisément les résultats obtenus par la construction géométrique en déplaçant un objet lumineux (une bougie) le long de l'axe principal d'un miroir sphérique.

Lorsque la bougie se trouve entre l'infini et le foyer d'un **miroir concave**, nous recevons l'image sur un écran : l'image est donc réelle (fig. 32). Cette image, qui est renversée, est plus petite ou plus gran-

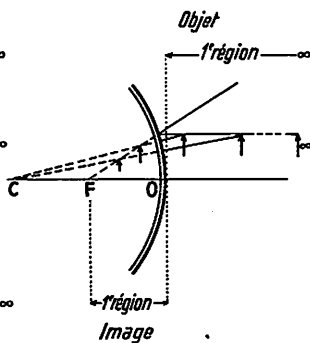


Fig. 31

Lorsque l'objet se déplace de l'infini au **miroir convexe**, l'image, sans cesse virtuelle, se déplace du foyer au miroir.

Quelle que soit la position de la bougie devant un **miroir convexe**, nous ne pouvons pas recevoir l'image sur un écran mais, en nous plaçant devant le miroir, nous observons l'image : cette image est

de que l'objet selon que ce dernier est situé entre l'infini et le centre de courbure ou entre le centre de courbure et le foyer.

virtuelle, droite, plus petite que l'objet (fig. 33).

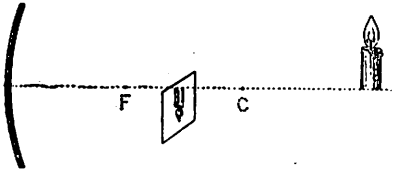


Fig. 32.

Lorsque la bougie se trouve entre le foyer et le miroir, nous ne pouvons plus recevoir l'image sur un écran mais, en nous plaçant devant le miroir, nous observons derrière le miroir une image virtuelle, plus grande que la bougie.

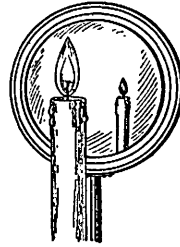


Fig. 33.

***Étude analytique.** — La détermination de la position et de la grandeur de l'image d'un objet par la construction géométrique est longue et pénible. Ne pourrait-on pas déterminer les propriétés de l'image par l'application simple et rapide d'une formule algébrique?

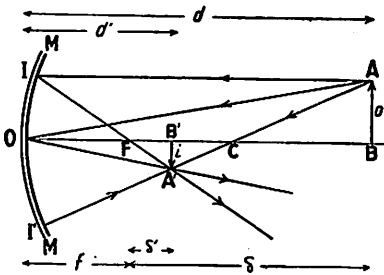


Fig. 34.

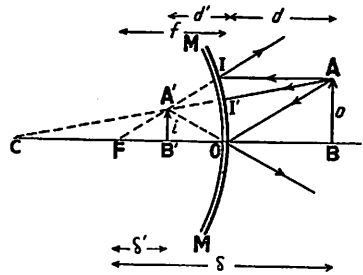


Fig. 35

Considérons, à cet effet, l'image A'B' d'un objet AB formée par un miroir sphérique (fig. 34 et 35). Pour simplifier les notations, désignons par o la grandeur de l'objet AB, par i la grandeur de l'image A'B', par d la distance OB de l'objet au miroir, par d' la distance OB' de l'image au miroir, par f la distance focale OF du miroir.

Menons le rayon incident AO passant par le sommet du miroir et le rayon réfléchi OA'. Les triangles semblables A'OB' et AOB nous donnent :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{d'}{d} \quad (1)$$

Les triangles semblables A'FB' et IFO nous donnent, en admettant que IO est égal à AB :

pour les miroirs concaves

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'F}{OF}$$

ou

$$\frac{i}{o} = \frac{d' - f}{f} \quad (2)$$

pour les miroirs convexes

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{B'F}{OF}$$

ou

$$\frac{i}{o} = \frac{f - d'}{f} \quad (2)$$

Egalons les relations (1) et (2), nous obtenons successivement :
pour les miroirs concaves

$$\frac{d'}{d} = \frac{d' - f}{f}$$

$$d'f = dd' - df$$

$$d'f + df = dd'$$

pour les miroirs convexes

$$\frac{d'}{d} = \frac{f - d'}{f}$$

$$d'f = df - dd'$$

$$d'f - df = -dd'$$

Divisons par le produit $dd'f$, nous obtenons :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Divisons par le produit $dd'f$, nous obtenons :

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = -\frac{1}{f} \quad (3)$$

Les relations (3) permettent de calculer la position de l'image en fonction de la position de l'objet; elles constituent les relations de position. La relation (1) permet de calculer la grandeur de l'image en fonction de la grandeur de l'objet : elle constitue la relation de grandissement.

***27. FORMULES DES MIROIRS.** — Les relations

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}}$$

et

$$\boxed{\gamma = \frac{i}{o} = \frac{d'}{d}}$$

(1)

sont les formules des miroirs sphériques. Elles permettent de déter-

(1) On donne parfois une autre forme aux formules des miroirs.

Les triangles semblables A'FB' et IFO donnent, en admettant que IO est égal à AB (fig. 34 et 35):

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{FB'}{FO} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{s'}{f} \quad (1)$$

miner la position et les propriétés des images données par les miroirs sphériques à condition de convenir que les grandeurs d , d' et f sont positives quand il s'agit d'objets, images et foyers réels et négatives quand il s'agit d'objets, images et foyers virtuels. Puisque les miroirs réfléchissent la lumière, il en résulte que les grandeurs d , d' et f sont positives quand elles expriment une distance devant le miroir et négatives quand elles expriment une distance derrière le miroir.

D'après ces conventions :

$f > 0$	miroir concave	$f < 0$	miroir convexe
$d > 0$	objet réel	$d < 0$	objet virtuel
$d' > 0$	image réelle	$d' < 0$	image virtuelle
$\gamma > 0$	image renversée	$\gamma < 0$	image droite

La discussion algébrique des formules des miroirs sphériques permet de retrouver tous les résultats obtenus par construction géométrique.

Remarquons que les formules générales des miroirs sphériques s'appliquent même aux miroirs plans : les miroirs plans peuvent être considérés comme des miroirs sphériques de rayon de courbure infini.

Il vient donc puisque $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{\infty} = 0$:

$$d = -d' \quad \text{et} \quad \gamma = -1$$

28. GRAPHIQUES DE LISSAJOUS (physicien français : 1822-1880). — Une méthode graphique élégante permet de prévoir aisément la position et les propriétés des images données par les miroirs sphériques.

Traçons deux axes perpendiculaires : l'axe horizontal représente les distances d de l'objet au miroir, l'axe vertical représente la distance d' de l'image au miroir. Déterminons préalablement le point A d'abscisse et d'ordonnée égales à la distance focale f comptée positivement dans le cas des miroirs concaves (fig. 36) et négativement dans le cas des miroirs convexes (fig. 37). Pour trouver la distance d' de l'image au miroir, portons sur l'axe horizontal la distance d ($d = OB$) de l'objet au miroir, joignons le point B au point A par un segment de droite et prolongeons, s'il y a lieu, le segment de droite

Les triangles semblables AFB et $F'FO$ donnent en admettant que $F'O$ est égal à $A'B'$

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OF}{FB} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{s} \quad (2)$$

En égalant les relations (1) et (2), nous obtenons :

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{s'}{f} = \frac{f}{s} \quad (3)$$

et

$$ss' = f^2 \quad (4)$$

Les relations (3) et (4) sont connues sous le nom d'équations de Newton.

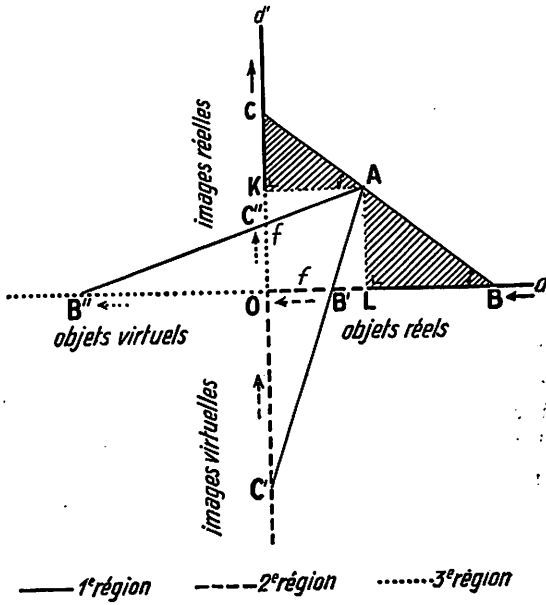


FIG. 36.

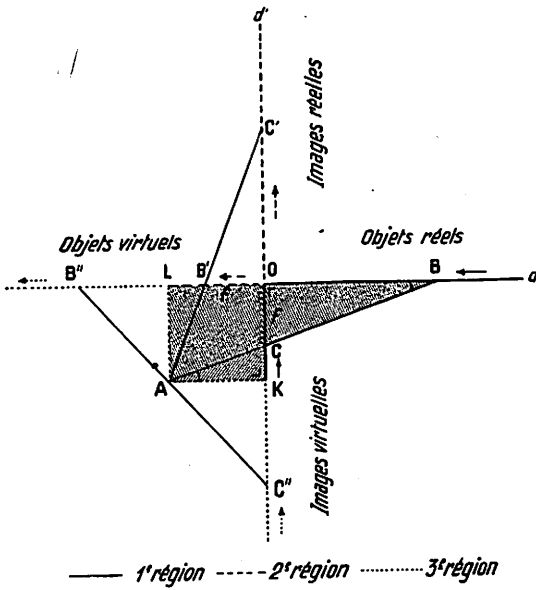


Fig. 37.

AB jusqu'au point C de l'axe des ordonnées : la distance OC est la distance d' ($d' = OC$) de l'image au miroir.

*Cette méthode se justifie aisément (1) : les rapports de similitude

$$\frac{CK}{AL} = \frac{AK}{BL}$$

des triangles semblables AKC et BLA (fig. 36 et 37) donnent :

$$\frac{d' - f}{f} = \frac{f}{d - f} \qquad \frac{f - d'}{f} = \frac{f}{d + f}$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \qquad \frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = -\frac{1}{f}$$

Nous retrouvons la relation de position des miroirs. *

Le graphique se rapportant au **miroir concave** permet de considérer trois régions (fig. 36):

1^{re} région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de ∞ à f . L'image se déplace de f à ∞ ; elle est réelle ($d' > 0$) et renversée ($\gamma > 0$).

2^e région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de f à 0. L'image se déplace de $-\infty$ à 0; elle est virtuelle ($d' < 0$) et droite ($\gamma < 0$).

3^e région. — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de 0 à $-\infty$. L'image se déplace de 0 à f ; elle est réelle ($d' > 0$) et droite ($\gamma < 0$).

Le graphique se rapportant au **miroir convexe** permet de considérer trois régions (fig. 37):

1^{re} région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de ∞ à 0. L'image se déplace de $-f$ à 0; elle est virtuelle ($d' < 0$) et droite ($\gamma < 0$).

2^e région. — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de 0 à $-f$. L'image se déplace de 0 à ∞ ; elle est réelle ($d' > 0$) et droite ($\gamma < 0$).

3^e région. — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de $-f$ à $-\infty$. L'image se déplace de $-\infty$ à $-f$; elle est virtuelle ($d' < 0$) et renversée ($\gamma > 0$).

29. DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA DISTANCE FOCALE D'UN MIROIR SPHÉRIQUE.

A) **Miroir concave.** — Pour déterminer expérimentalement la distance focale d'un miroir concave, nous faisons tomber un faisceau parallèle de lumière solaire sur le miroir dont l'axe principal est dirigé vers le Soleil (l'objet étant à l'infini, nous avons :

(1) La méthode graphique permet de retrouver la formule de position de Newton :

$$\frac{CK}{AL} = \frac{AK}{BL}; \quad \frac{\delta'}{f} = \frac{f}{\delta}; \quad \delta\delta' = f^2$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{\infty} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad d' = f).$$

Nous cherchons ensuite, au moyen d'un petit écran, le point de convergence du faisceau réfléchi. La distance de l'écran au miroir nous fournit directement la distance focale du miroir.

Nous pouvons aussi, en faisant voyager le long de l'axe principal du miroir une bougie et un écran, déterminer la position pour laquelle l'objet et l'image seront à égale distance du miroir (puisque $d = d'$, nous avons :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{2}{d'} = \frac{1}{f};$$

$$d' = 2f; \quad d' = R).$$

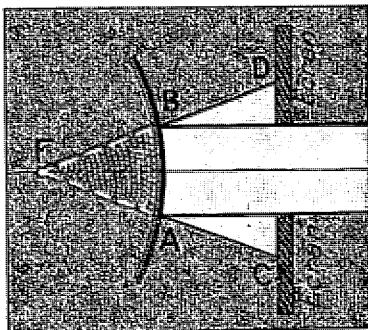


Fig. 38.

Cette distance est égale au rayon de courbure du miroir c'est-à-dire au double de la distance focale.

B) **Miroir convexe.** — Pour déterminer expérimentalement la distance focale d'un miroir convexe, nous disposons entre le Soleil et le miroir un grand écran percé d'une ouverture circulaire (fig. 38). Cet écran laisse passer un faisceau parallèle de lumière solaire qui, après réflexion, devient un faisceau divergent. Ce faisceau divergent produit sur l'écran un anneau lumineux. Déplaçons l'écran parallèlement à lui-même jusqu'à ce que l'anneau lumineux obtenu sur l'écran ait un diamètre CD double du diamètre AB du faisceau parallèle incident. Nous démontrons aisément, par la considération des triangles semblables AFB et CFD, que la distance de l'écran au miroir nous fournit la distance focale du miroir.

30. DÉFAUTS DES MIROIRS SPHÉRIQUES.

Aberration de sphéricité. — Nous avons montré que les rayons parallèles à l'axe principal convergent, après réflexion sur un miroir concave, en un même point : le foyer. En réalité, il n'en est rigoureusement ainsi que

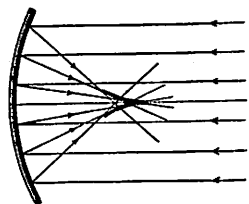


Fig. 39.

pour les rayons parallèles très voisins de l'axe principal : en effet, faisons tomber une série de faisceaux parallèles sur un miroir concave fixé sur le disque optique; nous observons qu'après réflexion les rayons marginaux coupent l'axe principal en des points plus rapprochés du miroir que les rayons centraux (fig. 39). Les intersections des rayons réfléchis dessinent une surface courbe, en forme d'entonnoir à paroi courbe, appelée **caustique par réflexion**. Ce défaut des miroirs sphériques, qui est connu sous le nom d'**aberration de sphéricité**, nuit beaucoup à la netteté des

images : l'image d'un point n'est jamais un point unique, même dans les miroirs sphériques de faible ouverture. Nous disons que les miroirs sphériques ne sont pas **aplanétiques**.

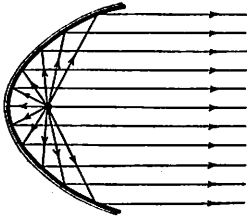


Fig. 40.

Pour supprimer l'aberration de sphéricité, nous utilisons les **miroirs paraboliques** qui sont aplanétiques : une source lumineuse placée au foyer de ces miroirs donne un faisceau rigoureusement parallèle (fig. 40). Les miroirs paraboliques sont employés pour la projection de la lumière à grande distance (phares, projecteurs).

Aberration d'astigmatisme. — Un faisceau parallèle fortement incliné sur l'axe principal ne converge pas, après réflexion sur un miroir concave, en un point unique. Les rayons réfléchis se rencontrent en des points situés sur deux droites perpendiculaires inégalement distantes du miroir. Ces droites sont dites **lignes focales**. Ce défaut du miroir sphérique est appelé **aberration d'astigmatisme**.

La figure 41 représente deux plans lumineux perpendiculaires l'un sur l'autre qui ont été réfléchis par un miroir concave sous une grande obliquité. Les rayons lumineux qui se propagent dans le plan vertical *abcd* convergent au milieu de la ligne *mn*; les rayons lumineux

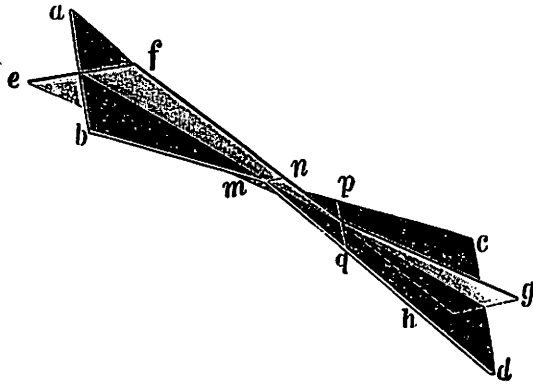


Fig. 41.

qui se propagent dans le plan horizontal *efgh* convergent au milieu de la ligne *pq*. Les rayons d'un faisceau cylindrique vont converger sur les lignes *mn* ou *pq*. Les lignes *mn* et *pq* sont les lignes focales.

Ces défauts expliquent que, pour obtenir des images nettes avec les miroirs sphériques, il soit nécessaire d'utiliser des miroirs de faible ouverture et de disposer l'objet près de l'axe principal pour éviter les rayons trop inclinés sur l'axe du miroir.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Où faut-il placer un objet devant un miroir concave de 80 cm de rayon pour obtenir une image droite, double de l'objet ?

SOLUTION. —

$$f = \frac{R}{2}; f = + \frac{80}{2} = + 40 \text{ cm.}$$

$$\gamma = \frac{i}{o}; \gamma = \frac{d'}{d} = - 2; \quad \text{d'où:} \quad d' = - 2d.$$

Remplaçons, dans la formule: $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$, d' et f par leurs valeurs respectives

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{2d} = \frac{1}{40}; \quad \frac{1}{2d} = \frac{1}{40}; \quad d = 20 \text{ cm.}$$

L'objet doit être placé à 20 cm du miroir; l'image, qui est virtuelle, se forme à — 40 cm du miroir (à vérifier par construction graphique).

2. Un objet est situé à 1 m d'un miroir convexe dont la distance focale est de 20 cm. Où se forme l'image; quelles en sont les propriétés ?

SOLUTION. —

$$d = + 100 \text{ cm}; \quad f = - 20 \text{ cm.}$$

Remplaçons, dans les formules des miroirs, d et f par leurs valeurs respectives :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{100} + \frac{1}{d'} = - \frac{1}{20}; \quad \frac{1}{d'} = - \frac{1}{20} - \frac{1}{100}; \quad d' = - \frac{100}{6} \text{ cm.}$$

$$\gamma = \frac{d'}{d}; \quad \gamma = - \frac{100}{100 \cdot 6}; \quad \gamma = - \frac{1}{6}$$

L'image, qui est située à 16,66 cm du miroir, est virtuelle et droite.

3. Un miroir sphérique donne sur un écran situé à 3 m une image de 80 cm sur 60 cm d'une photographie fortement éclairée de 4 cm sur 3 cm. a) Quelle espèce de miroir a-t-on employée ? b) L'image est-elle droite ou renversée ? c) A quelle distance du miroir se trouve la photographie ? d) Quelle est la distance focale du miroir ? e) Quelle est la position de l'image si on dispose un miroir plan perpendiculairement à l'axe principal du miroir sphérique à 2 m de ce dernier ?

SOLUTION. — a) d et d' sont positifs puisque l'objet et l'image sont réels.

Il en résulte que $\frac{1}{f} \left(\frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{d'} \right)$ est positif. Le miroir est donc concave.

b) $\gamma \left(\gamma = \frac{d'}{d} \right)$ est positif puisque d et d' sont positifs. L'image est renversée.

$$\text{c) } d = \frac{d'}{\gamma}; \quad d = \frac{300}{\gamma}; \quad \text{or, } \gamma = \frac{i}{o}; \quad \gamma = \frac{80}{4} = \frac{60}{3} = 20; \quad \text{donc, } d = \frac{300}{20} = 15 \text{ cm.}$$

La photographie est à 15 cm du miroir.

$$\text{d) } \frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{d'}; \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{15} + \frac{1}{300}; \quad f = 14,3 \text{ cm.}$$

La distance focale du miroir est de 14,3 cm.

e) Pour le miroir plan, l'objet, constitué par l'image qui se formerait à 1 m derrière le miroir plan, est virtuel.

$$d = - 100 \text{ cm}; \quad d' = - d; \quad d' = 100 \text{ cm.}$$

L'image est réelle et se forme à 1 mètre en avant du miroir plan.

EXERCICES NUMÉRIQUES

1. Deux miroirs plans parallèles M_1 et M_2 sont distants de 3 m. Un objet se trouve à 1 m du miroir M_1 . Déterminer les positions des cinq premières images lorsque l'observateur regarde a) le miroir M_1 ; b) le miroir M_2 . R : a) 1, 5, 7, 11 et 13 m; b) 2, 4, 8, 10 et 14 m.

2. Un miroir argenté sur ses deux faces tourne d'un mouvement uniforme à raison de 2 tours par seconde. Un rayon lumineux, issu d'une source fixe disposée à 2 m de l'axe de rotation du miroir, est réfléchi par le miroir tournant. Déterminer : a) la vitesse de

rotation du rayon lumineux réfléchi; b) le temps que dure le balayage d'un écran de 40 cm de longueur disposé à 10 m de l'axe de rotation du miroir. R : a) 4 tr/s; b) 1/628 s.

3. Devant un miroir sphérique de 160 cm de rayon de courbure, on place perpendiculairement à l'axe principal à 1,2 m du miroir un objet de 20 cm de hauteur. On demande la position par rapport au miroir et la grandeur de l'image a) dans le cas d'un miroir concave; b) dans le cas d'un miroir convexe. R : a) 240 cm et 40 cm; b) — 48 cm et 8 cm.

4. A quelle distance, exprimée en mètres, doit-on placer un objet devant un miroir concave de 2 m de rayon pour obtenir, par rapport à l'objet, a) une image renversée n fois plus grande; b) une image renversée n fois plus petite; c) une image droite n fois plus grande; d) une image droite n fois plus petite (n est un nombre supérieur à l'unité)?
 R : a) $\frac{n+1}{n}$; b) $n+1$; c) $\frac{n-1}{n}$ d) $1-n$ (objet virtuel).

5. Un objet se déplace devant un miroir sphérique de 50 cm de distance focale. Faire le graphique : a) de la position de l'image (ordonnées) en fonction de la position de l'objet (abscisses); b) de la grandeur de l'image en fonction de la position de l'objet (la grandeur de l'objet sera prise comme unité).

6. Un objet, disposé perpendiculairement à l'axe principal, se trouve à 75 cm d'un miroir concave de 25 cm de distance focale. Au foyer du miroir sphérique, on place un petit miroir plan, la face réfléchissante tournée vers le miroir sphérique. On demande : a) la distance à laquelle se forme l'image; b) les propriétés de cette image; c) la grandeur de cette image sachant que la grandeur de l'objet est de 28 cm. R : a) 12,5 cm; b) réelle et renversée; c) 14 cm.

CHAPITRE III.

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

§ 1. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX.

X 31. EXPÉRIENCE FONDAMENTALE.

Au fond d'une cuve remplie d'eau additionnée de fluorescéine (pour rendre le trajet des faisceaux lumineux plus visible), disposons un miroir plan. En

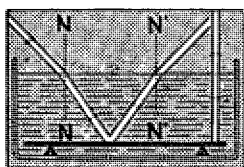


Fig. 42.

chambre obscure, faisons tomber obliquement sur la surface de l'eau un faisceau lumineux parallèle (fig. 42). Le faisceau lumineux se réfracte, à son passage de l'air dans l'eau, en se rapprochant de la normale NN à la surface de séparation des deux milieux : l'eau est dite **milieu plus réfringent** que l'air. Le faisceau lumineux, qui s'est réfléchi sur le miroir disposé sur le fond de la cuve, se réfracte, à son passage de l'eau dans l'air, en s'éloignant de la normale N'N' à la surface de séparation des deux milieux : l'air est dit **milieu moins réfringent** que l'eau.

Un faisceau lumineux parallèle, qui tombe normalement à la surface de l'eau, ne subit aucun changement de direction : le faisceau réfracté prolonge le faisceau incident (fig. 42).

Selon qu'un faisceau lumineux, tombant obliquement à la surface de séparation des deux milieux transparents A et B, se réfracte en se rapprochant plus de la normale le milieu B est réfringent que le milieu A s'éloignant moins

32. LOIS DE LA RÉFRACTION.

invention par Descartes

Expériences. — Fixons sur le disque optique un demi-cylindre de verre de telle manière que le centre de la face plane, orientée selon le diamètre DD' du disque, coïncide avec le centre du disque (fig. 43). Faisons tomber obliquement un rayon lumineux au point I, centre de la face plane du demi-cylindre de verre. Ce rayon, à son entrée dans le

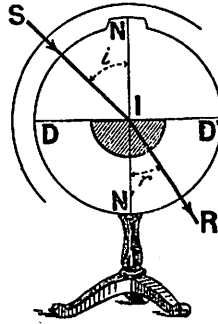


Fig. 43

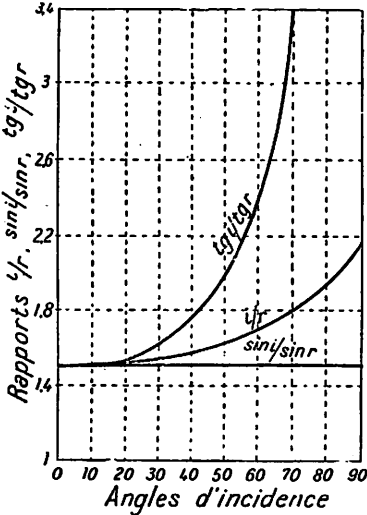


Fig. 44.

verre, subit un changement de direction puisqu'il ne se propage pas suivant la normale à la surface de séparation air-verre; à sa sortie du verre, il ne subit aucun changement de direction puisqu'il se propage suivant la normale à la surface de séparation verre-air. Lisons directement sur le disque l'angle d'incidence i formé par le rayon incident SI et la normale NN', lisons-y

également l'angle de réfraction r formé par le rayon réfracté IR avec la normale NN'. Faisons varier, par rotation du disque, la valeur de l'angle d'incidence et relevons les valeurs de l'angle de réfraction correspondant aux diverses valeurs de l'angle d'incidence. Calculons les rapports i/r , $\sin i/\sin r$, $\text{tg } i/\text{tg } r$. Les résultats de cette étude sont consignés dans le tableau-résumé suivant :

i	r	i/r	$\sin i/\sin r$	$\text{tg } i/\text{tg } r$
0	0	—	—	—
10	6,5	1,53	1,54	1,56
20	13	1,54	1,52	1,57
30	19,5	1,54	1,50	1,62
40	25,5	1,57	1,49	1,76
50	30,5	1,64	1,51	2,01
60	35	1,71	1,51	2,48
70	38,5	1,82	1,52	3,45
80	41	1,95	1,51	6,58
90	41,5	2,17	1,51	∞

L'examen de ce tableau et du graphique qui lui correspond (fig. 44) nous permet d'énoncer les lois de la réfraction découvertes indépendamment l'un de l'autre par Snellius (physicien hollandais : 1591-1626) et par Descartes (illustre physicien français : 1596-1650).

Lois de la réfraction. — Première loi. — Le rayon incident, la normale au point d'incidence et le rayon réfracté sont situés dans un même plan.

Deuxième loi. — Il existe un rapport constant entre le sinus de l'angle d'incidence et le sinus de l'angle de réfraction.

$$\boxed{\frac{\sin i}{\sin r} = n}$$

Le rapport n est appelé **indice de réfraction** du second milieu par rapport au premier milieu.

Remarque. — L'examen du tableau et du graphique qui précèdent montre que, pour des angles inférieurs à 20° , nous pouvons confondre les rapports des angles, des sinus et des tangentes. Nous avons donc pour des angles petits :

$$\frac{i}{r} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\text{tg } i}{\text{tg } r} = n$$

nduwn

33. INTERPRÉTATION DE L'INDICE DE RÉFRACTION.

— La détermination des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau a montré que le rapport de ces vitesses est égal à $4/3$. Or, l'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air est aussi égal à $4/3$. Par conséquent, nous avons :

$$n = \frac{V_{\text{air}}}{V_{\text{eau}}}$$

Généralisons cette observation : l'indice de réfraction n du milieu B par rapport au milieu A est égal au rapport de la vitesse de la lumière dans le milieu A à la vitesse de la lumière dans le milieu B

$$n = \frac{V_A}{V_B} \quad (1)$$

tandis que l'indice de réfraction n' du milieu A par rapport au milieu B est égal au rapport de la vitesse de la lumière dans le milieu B à la vitesse de la lumière dans le milieu A

$$n' = \frac{V_B}{V_A} \quad (2)$$

L'examen des relations (1) et (2) montre aisément que :

$$n' = \frac{1}{n}$$

L'indice de réfraction du milieu A par rapport au milieu B est l'inverse de l'indice de réfraction du milieu B par rapport au milieu A. Ainsi, l'indice de réfraction du verre par rapport à l'air est $3/2$ tandis que l'indice de réfraction de l'air par rapport au verre est $2/3$.

34. INDICES DE RÉFRACTION. — On appelle **indice usuel** n d'un milieu A l'indice de réfraction de ce milieu par rapport à l'air.

$$n = \frac{V_{air}}{V_A} \quad (1)$$

On appelle **indice absolu** N du milieu A l'indice de réfraction de ce milieu par rapport au vide

$$N = \frac{c}{V_A} \quad (2)$$

c désignant la vitesse de la lumière dans le vide.

Des relations (1) et (2), on tire facilement :

$$N = \frac{V_{air}}{V_A} \cdot \frac{c}{V_{air}} ; N = n \cdot N_{air}$$

L'indice absolu N d'une substance est égal au produit de l'indice usuel n de cette substance par l'indice absolu N_{air} de l'air. Or, l'indice absolu de l'air vaut 1,00029. Il en résulte que l'indice absolu d'une substance ne diffère guère de l'indice usuel. On trouvera les indices absolus de quelques substances dans le tableau suivant :

Indices de réfraction (Raie D du Sodium) (1).

SOLIDES		LIQUIDES		GAZ	
Diamant	2,41	Eau	1,33	Air	1,00029
Glace	1,31	Alcool		Anhydride carbonique	1,00045
Crown (2)	1,52	éthylrique	1,36	Vapeur d'eau	1,00025
Flint (2)	1,65	Sulfure de carbone	1,66	Chlore	1,00077
Spath	1,66	Benzine	1,50		
Cristal (2)	1,67				

L'indice n du milieu B par rapport au milieu A est égal au quotient n_B/n_A des indices usuels de ces milieux : en effet

$$n = \frac{V_A}{V_B} ; \quad n = \frac{V_{air}}{V_B} \cdot \frac{V_A}{V_{air}} ; \quad n = \frac{n_B}{n_A}$$

(1) L'indice de réfraction d'une substance varie avec la couleur de la lumière employée. Les indices que nous donnons dans ce tableau se rapportent à la raie jaune du sodium.

(2) Le crown est un verre renfermant une forte proportion (10 %) de baryum ou de bore ; le flint est un verre au plomb (40 %) ; le cristal est un verre au plomb.

Il en résulte que le passage de la lumière du milieu A au milieu B obéit à la relation

$$\sin i_A = n \sin r_B$$

$$\sin i_A = \frac{n_B}{n_A} \sin r_B$$

$$n_A \sin i_A = n_B \sin r_B$$

forme générale de la seconde loi de la réfraction.

35. LOI DU RETOUR INVERSE.

Expérience. — Recevons, sous une incidence i (45°), un faisceau lumineux sur le centre de la face plane du demi-cylindre de verre fixé sur le disque optique (fig. 38); notons l'angle d'émergence r (28°). Faisons tourner le disque d'un angle de 180° . Faisons tourner l'écran de manière à envoyer à travers le demi-cylindre un faisceau lumineux qui tombe sur la face plane sous une incidence r (28°); nous constatons que l'angle d'émergence est l'angle i (45°) (fig. 45).

Conclusion. — Le trajet suivi par la lumière ne dépend pas du sens de propagation de la lumière : il y a réciprocity entre le rayon incident et le rayon réfracté.

***Étude analytique.** — L'indice de réfraction n' d'un milieu A par rapport à un milieu B est l'inverse de l'indice de réfraction n du milieu B par rapport au milieu A (n° 33) :

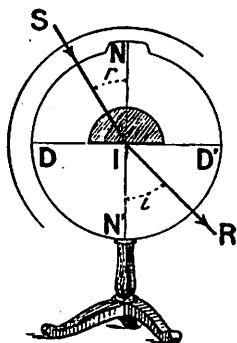


Fig. 45.

$$n' = \frac{1}{n}$$

Un rayon lumineux qui passe de A en B sous une incidence i se réfracte en faisant un angle r tel que :

$$\sin i = n \sin r. \quad (1)$$

Un rayon lumineux qui passe de B en A sous une incidence i' se réfracte en faisant un angle r' tel que :

$$\sin i' = n' \sin r'.$$

Si i' est égal à r , nous avons successivement :

$$n' \sin r' = \sin r ; \quad \frac{1}{n} \sin r' = \sin r ; \quad \sin r' = n \sin r. \quad (2)$$

Nous obtenons donc en comparant les relations (1) et (2) :

$$\sin r' = \sin i \quad \text{et} \quad r' = i.$$

Il y a donc réciprocity entre le rayon incident et le rayon réfracté.

36. CONSTRUCTION DU RAYON RÉFRACTÉ. — Consi-

dérons le rayon incident SI qui tombe à la surface de séparation LL' de l'air et du verre (fig. 46). Comment construi- rons-nous le rayon réfracté sachant que l'indice de réfraction du verre est 3/2? A cet effet, élevons la perpendiculaire NN' à la surface de séparation LL' au point d'incidence I. Avec I comme centre, décrivons une circonférence de rayon quelconque. Du point de rencontre P de la circonférence et du rayon incident, abaissons la perpendiculaire PP' et divisons le segment IP' en trois parties égales. Portons, à partir du point I, sur le segment IL' une longueur IR' égale à deux de ces parties et élevons au point R' la perpendiculaire à la surface de séparation LL' : cette droite coupe la circonférence au point R. Joignons IR. Le rayon réfracté suit la direction IR. En effet :

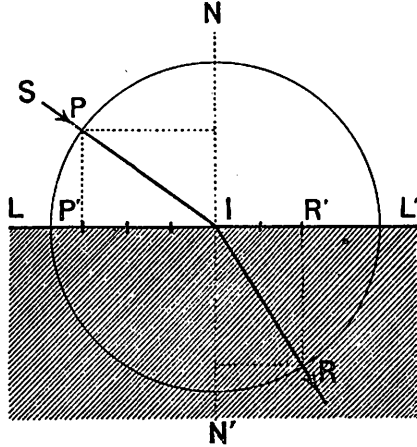


Fig. 46.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{IP'}{IR'} = \frac{3}{2}.$$

Discussion de la loi de Descartes.

37. PASSAGE DE LA LUMIÈRE D'UN MILIEU DANS UN AUTRE MILIEU PLUS RÉFRINGENT. — ANGLE LIMITE.

Expérience. — En chambre obscure, faisons tomber sur l'eau (additionnée de fluorescéine) contenue dans une cuve un faisceau lumineux parallèle dont nous faisons varier l'incidence de 0° à 90°. Nous observons : à mesure qu'augmente l'angle d'incidence, le faisceau réfracté diminue d'intensité tandis que le faisceau réfléchi augmente d'intensité ; l'angle de réfraction reste sans cesse inférieur à l'angle d'incidence et atteint une valeur limite pour une incidence de 90°. L'angle de réfraction l , qui correspond à une incidence de 90°, est appelé **angle limite**.

***Étude analytique.** — La loi de Descartes nous permet de prévoir ces résultats. Écrivons la formule $\sin i = n \sin r$, dans laquelle n est supérieur à l'unité, sous la forme :

$$\sin r = \frac{\sin i}{n}.$$

1°) L'incidence est nulle :

$$i = 0^\circ ; \sin r = \frac{\sin 0^\circ}{n} ; \sin r = 0 ; r = 0^\circ.$$

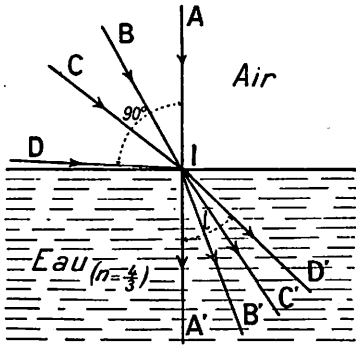


Fig. 47.

Un rayon lumineux qui se propage normalement à la surface de séparation de deux milieux ne subit pas de déviation (fig. 47 : rayon AIA').

2°) L'incidence est comprise entre 0° et 90° :

$$0^\circ < i < 90^\circ ; \sin r = \frac{\sin i}{n} ;$$

$$\sin r < \sin i ; r < i.$$

Un rayon lumineux qui passe obliquement d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent se réfracte en se rapprochant de la normale (fig. 47 : rayons BIB', CIC').

3°) L'incidence est égale à 90° :

$$i = 90^\circ ; \sin r = \frac{\sin 90^\circ}{n} ; \sin r = \frac{1}{n} ; r = l.$$

Un rayon lumineux qui rase la surface de séparation des deux milieux se réfracte en faisant un angle dont la valeur l est donnée par la relation : $\sin l = 1/n$ (fig. 47 : rayon DID').

Dans le cas de l'eau, la valeur de l'angle limite vaut :

$$\sin l = \frac{1}{4/3} = \frac{3}{4} \quad \text{et} \quad l = 48^\circ.$$

38. PASSAGE DE LA LUMIÈRE D'UN MILIEU DANS UN AUTRE MILIEU MOINS RÉFRINGENT. — RÉFLEXION TOTALE.

Expérience. — Disposons dans le fond d'une cuve contenant de l'eau une lampe électrique dont la paroi opaque présente une série de petits cercles transparents (fig. 48). Les faisceaux lumineux issus de la lampe électrique tombent sur la surface de séparation eau-air sous des incidences différentes. Le faisceau normal à la surface de séparation sort sans subir de déviation. Les faisceaux obliques subissent à la surface de séparation soit la réfraction et la réflexion, soit uniquement la réflexion. Les faisceaux complètement réfléchis subissent la réflexion totale.

Explication. — Les rayons lumineux qui tombent à la surface de séparation des deux milieux sous une incidence inférieure à l'angle

limite se réfractent en faisant un angle de réfraction supérieur à l'angle d'incidence (fig. 49 : rayons SI_2S_2 , SI_3S_3).

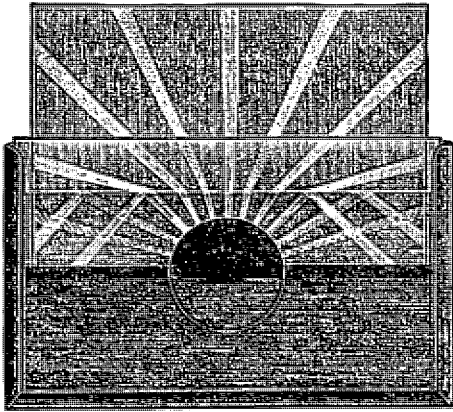


Fig. 48.

Le rayon lumineux qui tombe sous une incidence égale à l'angle limite se réfracte en faisant un angle de réfraction égal à 90° (fig. 49 : rayon SI_4S_4).

Les rayons lumineux qui tombent sous une incidence supérieure à l'angle limite ne se réfractent pas; ils subissent la réflexion totale (fig. 49 : rayon SI_5S_5).

***Étude analytique.** — La formule de Descartes rend compte de ces phénomènes. Ecrivons la formule $\sin i = n' \sin r$, dans laquelle n' est inférieur à l'unité, sous la forme suivante :

$$\sin r = \frac{\sin i}{n'}$$

1^o) L'incidence est nulle :

$$i = 0^\circ; \quad r = 0^\circ.$$

Un rayon lumineux qui se propage normalement à la surface de séparation de deux milieux ne subit pas de déviation (fig. 49 : rayon SI_1S_1).

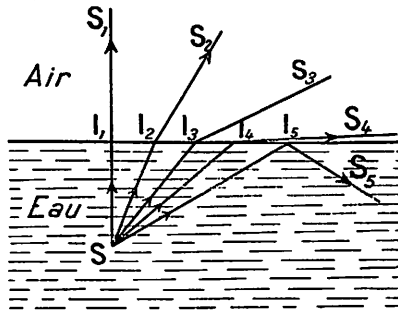


Fig. 49.

2^o) L'incidence, qui n'est pas nulle, est inférieure à l'angle limite :

$$0^\circ < i < l; \quad \sin r = \frac{\sin i}{n'}; \quad \sin r > \sin i; \quad r > i.$$

Un rayon lumineux qui passe d'un milieu dans un autre milieu moins réfringent sous une incidence inférieure à l'angle limite se réfracte en s'écartant de la normale (fig. 49 : rayons SI₂S₂, SI₃S₃).

3°) L'incidence est égale à l'angle limite :

$$i = l ; \quad \sin r = \frac{\sin l}{n'} ; \quad \sin r = 1 ; \quad r = 90^\circ ;$$

$$\text{puisque } \sin l = \frac{1}{n} = n'.$$

Un rayon lumineux qui tombe sur la surface de séparation des deux milieux sous une incidence égale à l'angle limite se réfracte en rasant la surface de séparation (fig. 49 : rayon SI₄S₄).

4°) L'incidence est supérieure à l'angle limite :

$$i > l ; \quad \sin r > 1 ; \quad \text{impossibilité.}$$

Un rayon lumineux qui tombe sur la surface de séparation des deux milieux sous une incidence supérieure à l'angle limite ne peut pas se réfracter ; il ne peut que se réfléchir (fig. 49 : rayon SI₅S₅).

✓ 39. **CONDITIONS DE RÉFLEXION TOTALE.** — Pour qu'un rayon lumineux subisse le phénomène de réflexion totale, deux conditions sont indispensables : 1°) le rayon lumineux doit passer d'un milieu dans un autre moins réfringent ; 2°) le rayon lumineux doit tomber sur la surface de séparation des deux milieux sous une incidence supérieure à l'angle limite.

Signalons encore quelques expériences de réflexion totale :

1°) Adaptons une épingle au centre d'un disque en liège de six centimètres de diamètre de façon que l'épingle ait deux centimètres de hauteur. Posons le bouchon sur l'eau d'une cuve en y faisant plonger l'épingle (fig. 50). De tous les rayons issus de l'épingle, seuls les rayons qui subissent la réflexion totale ne sont pas interceptés par le bouchon. L'œil, placé au-dessous de la surface de l'eau, voit l'épingle directement et son image par réflexion à la surface de l'eau.

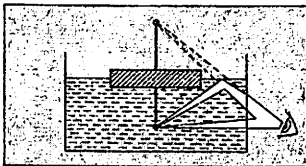


Fig. 50.

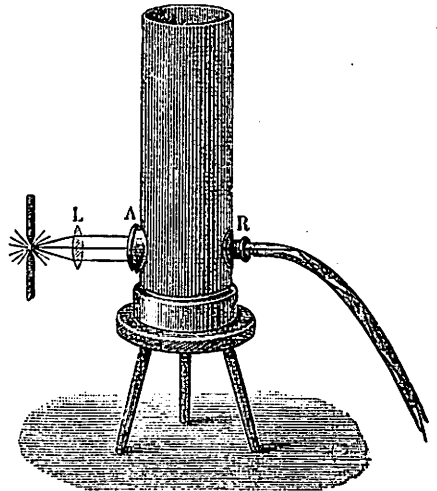


Fig. 51.

2°) Un étroit faisceau lumineux qui pénètre dans un tube de verre parabolique où coule de l'eau subit des réflexions totales sur les parois du tube (fig. 51). La lumière semble suivre un trajet curviligne. Le même phénomène se produit dans un jet d'eau parabolique; il est utilisé, dans les arts décoratifs, pour l'obtention de fontaines lumineuses.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Une cuve renferme une couche d'eau surmontée d'une couche de benzine. a) Un rayon lumineux issu de l'eau se présente sous une incidence de 30° à la surface de séparation eau-benzine. Quel sera l'angle d'émergence du rayon lumineux à la sortie de la benzine? b) Sous quelle incidence doit-il tomber sur la surface de séparation eau-benzine pour subir la réflexion totale sur la surface de séparation benzine-air?

SOLUTION. — a) L'angle de réfraction r à l'entrée dans la benzine est tel que :

$$n_A \sin i = n_B \sin r; \quad \frac{4}{3} \sin 30^\circ = \frac{3}{2} \sin r; \quad \sin r = \frac{4}{9}$$

L'indice de réfraction de l'air par rapport à la benzine vaut :

$$n' = \frac{1,00029}{3/2} \neq \frac{2}{3}$$

L'angle d'émergence e à la sortie de la benzine est tel que :

$$\sin e = \frac{\sin r}{n'}; \quad \sin e = \frac{4/9}{2/3} = \frac{2}{3}$$

$$e = 42^\circ.$$

b) Pour que le rayon lumineux se réfracte en rasant la surface de séparation benzine-air, il faut que l'angle de réfraction r à l'entrée dans la benzine soit tel que :

$$\sin e = \frac{\sin r}{2/3}; \quad \frac{\sin r}{2/3} = \sin 90^\circ$$

c'est-à-dire que

$$\sin r = \frac{2}{3}$$

L'angle d'incidence i sur la surface de séparation eau-benzine doit être tel que

$$n_A \sin i = n_B \sin r; \quad \frac{4}{3} \sin i = \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{3}; \quad \sin i = \frac{3}{4}$$

$$i = 48^\circ.$$

Pour qu'il y ait réflexion totale sur la surface de séparation benzine-air, il faut donc que le rayon lumineux tombe sur la surface de séparation eau-benzine sous une incidence supérieure à 48°.

2. Quel doit être le rayon r d'un bouchon circulaire en fonction de la longueur h de l'aiguille plongée dans l'eau pour n'avoir aucun rayon sortant de l'eau (fig. 50)?

SOLUTION. — L'indice de réfraction de l'eau par rapport à l'air étant de 4/3, il en résulte que :

$$\sin l = \frac{1}{n}; \quad \sin l = \frac{3}{4}; \quad l = 48^\circ.$$

Pour qu'il n'y ait aucun rayon sortant de l'eau, il faut que :

$$\operatorname{tg} l = \frac{r}{h} \quad \text{d'où} \quad r = h \operatorname{tg} 48^\circ$$

$$r = 1,11 h$$

§ 2. MILIEUX RÉFRINGENTS A FACES PLANES

1. RÉFRACTION A TRAVERS UNE FACE PLANE.

40. VISION DES OBJETS DANS L'EAU.

Expériences. — 1. Observons un bâton plongé obliquement dans l'eau. La partie immergée du bâton nous paraît relevée; il nous semble que le bâton est brisé au point où il pénètre dans l'eau (fig. 52).

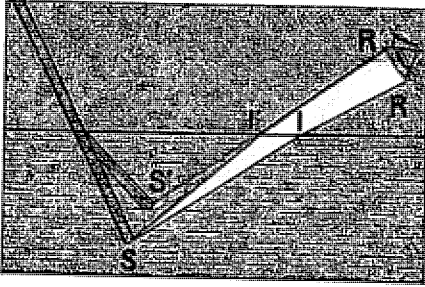


Fig. 52.

2. Disposons au même niveau deux pièces de monnaie : l'une sur le fond d'une cuve, l'autre à côté de la cuve. Versons de l'eau dans la cuve. La pièce qui se trouve dans la cuve nous apparaît d'autant plus relevée que la hauteur de l'eau dans la cuve est plus grande.

Explication. — Considérons les rayons SI et SI' limitant un étroit faisceau divergent issu du point S de l'objet. Ces rayons SI et SI', en passant de l'eau dans l'air, se réfractent en s'écartant de la normale et suivent les directions IR et I'R'. Pour l'œil qui les reçoit, ces rayons IR et I'R' semblent provenir du point S', point plus élevé que le point S.

***Étude analytique.** — Considérons un point lumineux S situé dans l'eau à une profondeur h (fig. 53). Le rayon SI, normal à la surface de séparation eau-air, sort de l'eau sans déviation. Le rayon SI', oblique à la surface de séparation eau-air, sort de l'eau en s'écartant de la normale. Le prolongement du rayon réfracté I'R rencontre le rayon SI en un point S' distant de h' de la surface de séparation. Dans les triangles SII' et S'I I', nous avons :

$$\text{tg } i = \frac{II'}{SI}; \quad \text{tg } i = \frac{II'}{h}$$

et

$$\text{tg } r = \frac{I I'}{S'I}; \quad \text{tg } r = \frac{I I'}{h'}$$

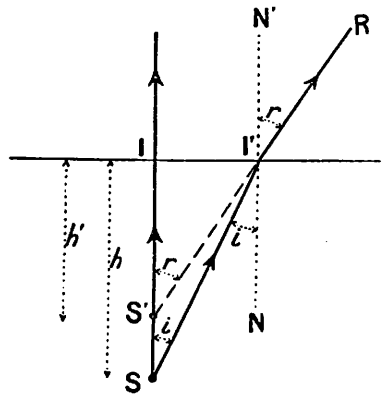


Fig. 53.

d'où nous tirons :

$$\frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r} = \frac{h'}{h}$$

et

$$h' = h \cdot \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

Pour que le point S' soit l'image du point S , il faudrait que tous les rayons issus du point S semblent, après réfraction, émaner du point S' ; il faudrait, en d'autres termes, que la distance h' soit constante. Or, ce n'est pas le cas puisque le rapport $\operatorname{tg} i/\operatorname{tg} r$ n'est pas le même pour tous les rayons issus du point S . Le point S' n'est donc pas une image du point S .

Toutefois, si nous considérons des rayons voisins de la normale, nous pouvons assimiler le rapport $\operatorname{tg} i/\operatorname{tg} r$ au rapport $\sin i/\sin r$ et admettre que ces rayons semblent, après réfraction, émaner du point S' . Ce point S' qui, dans ces conditions, peut être considéré comme l'image du point S se trouve à une distance h' de la surface de séparation eau-air telle que :

$$h' = h \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}; \quad h' = h \frac{\sin i}{\sin r}; \quad h' = nh; \quad h' = \frac{3}{4} h.$$

L'objet S paraît donc relevé d'un quart de sa profondeur dans l'eau.

2. RÉFRACTION A TRAVERS UNE LAME A FACES PARALLÈLES.

41. LAME A FACES PARALLÈLES.

Expériences. — 1. Faisons tomber obliquement un faisceau lumineux parallèle sur l'une des bases d'un trapèze de verre fixé sur le disque optique. Nous observons que le faisceau émergent est parallèle au faisceau incident (fig. 54). Le faisceau lumineux en traversant la lame à faces parallèles s'est donc déplacé parallèlement à lui-même.

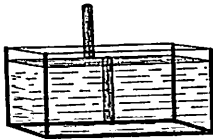


Fig. 55.

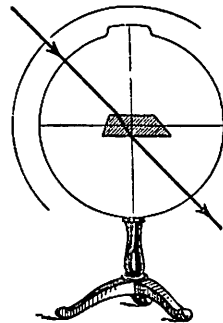


Fig. 54.

2. Regardons obliquement une règle disposée contre la face postérieure d'une cuve de verre remplie d'eau (fig. 55). Nous observons que la partie de la règle vue à travers l'eau est écartée de la partie de la règle vue à travers l'air.

Explication. — Le rayon lumineux incident SI subit à l'entrée d'une lame de verre ($n = 3/2$) une réfraction telle que (fig. 56) :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{3}{2}. \quad (1)$$

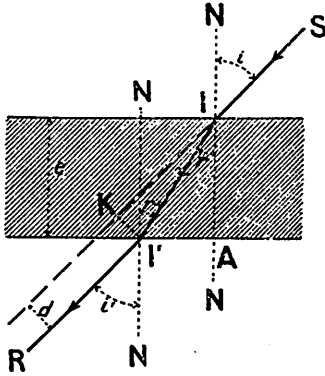


Fig. 56.

Le rayon lumineux, qui se propage dans le verre suivant II', subit à la sortie de la lame de verre une réfraction telle que :

$$\frac{\sin r'}{\sin i'} = \frac{2}{3}. \quad (2)$$

En comparant les égalités (1) et (2), nous remarquons que :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin i'}{\sin r'}.$$

Or, les angles r et r' sont égaux comme alternes-internes. Nous avons donc :

$$\begin{aligned} \sin i &= \sin i'; \\ i &= i'. \end{aligned}$$

Le rayon incident SI est donc parallèle au rayon émergent I'R.

***Étude analytique.** — Calculons le déplacement latéral d , égal à I'K, subi par le rayon lumineux (fig. 56). Désignons par n l'indice de réfraction de la lame et par e son épaisseur. Les triangles rectangles IAI' et IKI' nous donnent :

$$\cos r = \frac{e}{II'} \quad \text{et} \quad \sin(i - r) = \frac{d}{II'}$$

En combinant ces deux relations, il vient :

$$d = e \cdot \frac{\sin(i - r)}{\cos r}$$

Le déplacement latéral du rayon lumineux croît donc avec l'épaisseur de la lame, avec l'angle d'incidence du rayon lumineux et avec l'indice de réfraction de la substance constituant la lame.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. On estime à 60 cm la profondeur d'une eau limpide. Quelle est la profondeur réelle de l'eau ?

SOLUTION. —

$$h' = \frac{3}{4} h; \quad h = \frac{4}{3} h'; \quad h = \frac{4}{3} \cdot 60 = 80 \text{ cm.}$$

2. Calculer le déplacement latéral que produit une lame de verre ($n = 3/2$) de 2 cm d'épaisseur pour des incidences : 0° , 30° , 60° , 90° . Tracer le graphique déplacement-angle d'incidence.

SOLUTION. — En appliquant la relation $d = e \frac{\sin(i - r)}{\cos r}$, on obtient successivement :

$i = 0^\circ$ $d = 0$ cm.

$i = 30^\circ$; $\sin r = \frac{\sin i}{n}$; $\sin r = \frac{\sin 30^\circ}{\frac{3}{2}} = \frac{1}{3}$; $r = 19^\circ$; $d = 2 \cdot \frac{\sin 11^\circ}{\cos 19^\circ} = 0,41$ cm.

$i = 60^\circ$; $\sin r = \frac{\sin i}{n}$; $\sin r = \frac{\sin 60^\circ}{\frac{3}{2}} = 0,58$; $r = 35^\circ$; $d = 2 \cdot \frac{\sin 25^\circ}{\cos 35^\circ} = 1$ cm.

$i = 90^\circ$: $r = 42^\circ$; $d = 2 \cdot \frac{\sin 48^\circ}{\cos 42^\circ} = 2$ cm.

3. RÉFRACTION A TRAVERS UN PRISME.

42. DÉFINITIONS. — Un prisme est formé d'un milieu réfringent limité par deux faces planes non parallèles dont l'intersection constitue l'arête du prisme. Nous appelons : **angle du prisme**, l'angle formé par les deux faces planes; **base du prisme**, la face opposée à l'arête et limitant le prisme; **section principale du prisme**, toute section perpendiculaire à l'arête.

La réfraction d'un rayon lumineux dans un prisme suit les lois ordinaires de la réfraction; il en résulte que tout rayon lumineux se propageant dans une section principale reste, après réfraction, dans la même section principale.

43. PROPRIÉTÉS DU PRISME. — DÉVIATION ET DISPERSION.

Expériences. — 1. Faisons tomber sur un prisme un faisceau de lumière solaire (lumière blanche). Nous constatons que la partie du faisceau qui rencontre le prisme est déviée vers la base du prisme (fig. 57). Recevons le faisceau émergent sur un écran, nous observons non

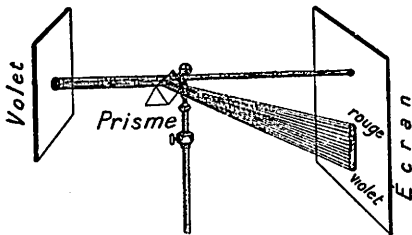


Fig. 57.

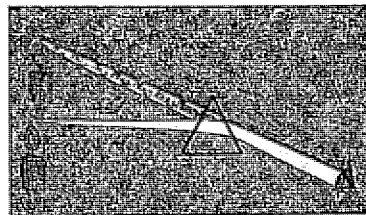


Fig. 58.

pas une tache blanche mais une large bande colorée dans laquelle nous distinguons sept nuances principales : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet. La lumière blanche, qui est composée de plusieurs lumières différemment colorées (lumière polychromatique), est dispersée par le prisme.

2. Interposons une lame de verre coloré (rouge ou bleu) sur le trajet de a lumière blanche. Nous observons à nouveau le phénomène de déviation vers la base du prisme mais nous ne constatons plus le phénomène de dispersion.

3. Regardons la flamme d'une bougie à travers un prisme, nous observons une image virtuelle, déplacée vers l'arête du prisme (fig. 58). Cette image n'est généralement pas très nette et présente des bords irisés.

Conclusion. — Le prisme exerce deux effets sur la lumière polychromatique : déviation vers la base du prisme et dispersion ; il n'exerce qu'un seul effet sur la lumière monochromatique : déviation vers la base du prisme.

44. **EXPLICATION DE LA DÉVIATION.** — Les lois de la réfraction expliquent la déviation produite par un prisme sur la lumière. Considérons, à cet effet, une section principale d'un prisme (fig. 59).

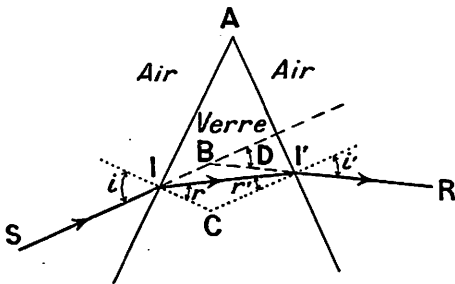


Fig. 59.

Le rayon incident monochromatique SI, à son entrée dans le prisme, se réfracte en se rapprochant de la normale et prend la direction II'. Le rayon, à sa sortie du prisme, se réfracte en s'écartant de la normale et prend la direction I'R. Les deux réfract-

ions ont eu pour effet de le faire dévier vers la base du prisme. L'angle D que font entre elles les directions du rayon incident SI et du rayon émergent I'R mesure la déviation subie par le rayon.

*45. **ÉQUATIONS DU PRISME.** — Calculons la déviation subie par un rayon monochromatique lors de son passage dans un prisme (fig. 59). Les lois de la réfraction donnent, si n désigne l'indice de réfraction du prisme :

$$\text{à l'entrée du prisme,} \quad \sin i = n \sin r; \quad (1)$$

$$\text{à la sortie du prisme,} \quad \sin i' = n \sin r'. \quad (2)$$

Le quadrilatère AICI' étant inscriptible et les angles en I et en I' de ce quadrilatère étant droits pour raison de construction, il vient :

$$A + C = 2 \text{ Droits.}$$

Le triangle ICI' nous donne :

$$C + r + r' = 2 \text{ Droits.}$$

Nous avons donc :

$$r + r' = A. \quad (3)$$

La déviation totale D est égale à la somme de la déviation ($i - r$) que le rayon a subie à l'entrée en I et de la déviation ($i' - r'$) que le rayon a subie à la sortie en I'. Il s'ensuit :

$$D = i - r + i' - r'; \quad D = i + i' - (r + r');$$

$$\boxed{D = i + i' - A} \quad (4)$$

Les relations (1), (2), (3) et (4) constituent les équations du prisme; elles permettent de résoudre tous les problèmes se rapportant au prisme.

Remarque. — Si l'angle A du prisme est petit et si l'angle d'incidence i est faible (rayons voisins de la normale), les angles r , r' et i' ont des valeurs petites. Nous pouvons dès lors remplacer les équations (1) et (2) par les équations : $i = nr$ et $i' = nr'$. Il en résulte que :

$$D = i + i' - A; \quad D = n(r + r') - A.$$

$$\boxed{D = (n - 1)A}$$

La déviation subie par un rayon monochromatique, lors de son passage dans un prisme de petit angle, est indépendante de l'incidence.

46. VARIATION DE LA DÉVIATION AVEC L'INDICE DE RÉFRACTION DU PRISME.

Expérience. — Disposons sur le trajet d'un faisceau parallèle de lumière monochromatique un polyprisme constitué de plusieurs prismes de même angle mais de substances d'indices croissants. Sur un écran, nous observons une série de taches lumineuses S_1, S_2, S_3 d'autant plus déviées vers la base du polyprisme que l'indice de la substance traversée par la lumière est plus élevé (fig. 60).

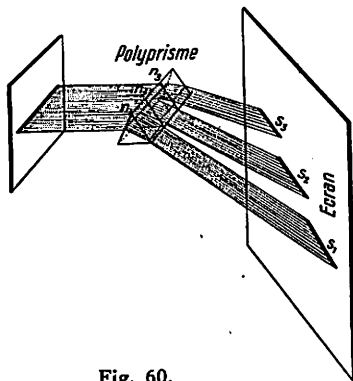


Fig. 60.

Conclusion. — La déviation augmente avec l'indice de réfraction du prisme.

***Étude analytique.** — Les formules du prisme permettent de prévoir l'influence de l'indice de réfraction n . En effet, i et A étant constants, si n augmente, r diminue ($\sin r = \sin i/n$); mais si r diminue, r' augmente ($r' = A - r$) et i' augmente également ($\sin i' = n \sin r'$). Donc, lorsque n augmente la déviation augmente ($D = i + i' - A$).

47. VARIATION DE LA DÉVIATION AVEC L'ANGLE DU PRISME.

Expérience. — Pour étudier la variation de la déviation avec l'angle du prisme, nous utilisons un prisme à angle variable constitué d'une auge limitée par deux lames de verre, mobiles autour de charnières parallèles, et par deux plaques de laiton immobiles. Faisons tomber un faisceau parallèle de lumière monochromatique sur l'une des faces du prisme rempli d'eau. Maintenons la face d'entrée immobile de manière à ne pas modifier l'incidence et inclinons de plus en plus la face de sortie. Nous observons que la déviation est d'autant plus grande que la face de sortie est plus inclinée c'est-à-dire que l'angle A du prisme est plus grand (fig. 61).

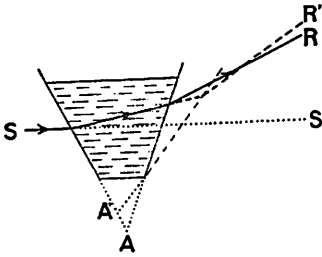


Fig. 61.

Conclusion. — La déviation augmente avec l'angle du prisme.

***Étude analytique.** — Les formules du prisme permettent encore de prévoir l'influence de l'angle A du prisme. En effet, i et n étant constants, si A augmente, r' augmente ($r' = A - r$) mais si r' augmente, i' augmente également ($\sin i' = n \sin r'$). L'indice de réfraction n étant supérieur à l'unité, l'augmentation de i' est plus considérable que l'augmentation de r' , augmentation qui est égale à celle de A . Donc, la déviation augmente ($D = i + i' - A$).

48. VARIATION DE LA DÉVIATION AVEC L'ANGLE D'INCIDENCE.

Expérience. — Fixons un prisme en verre sur le disque optique dans la position indiquée par la figure 62. Faisons tomber un faisceau monochromatique au centre du disque: ce faisceau se partage en deux: un faisceau direct et un faisceau dévié. Nous lisons directement sur le disque optique l'angle de déviation D et l'angle d'incidence i . Nous obtenons l'angle d'émergence i' en portant à partir du diamètre IO l'angle OIN' égal à l'angle A du prisme et en traçant IN' : l'angle $N'IR$ est l'angle d'émergence i' . En faisant tourner le disque, nous faisons varier l'angle d'incidence. Relevons pour diverses valeurs de i , comprises entre 0° et 90° , les valeurs correspondantes de i' et de D . Le graphique de la figure 63 donne les résultats de cette étude pour un prisme en flint (indice : 1,6) d'angle 45° .

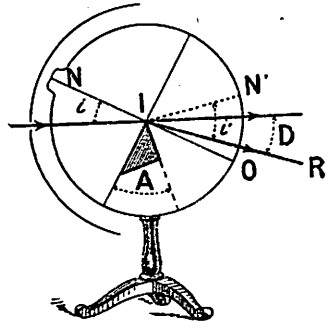


Fig. 62.

Conclusion. — La déviation présente un minimum quand l'angle d'incidence i est égal à l'angle d'émergence i' .

***Étude analytique.** — La déviation minimum ne peut correspondre qu'à une valeur minimum de la somme $i + i'$ puisque

l'angle A est constant. Si le minimum de déviation se produisait pour un angle d'incidence i différent de l'angle d'émergence i' , ce minimum

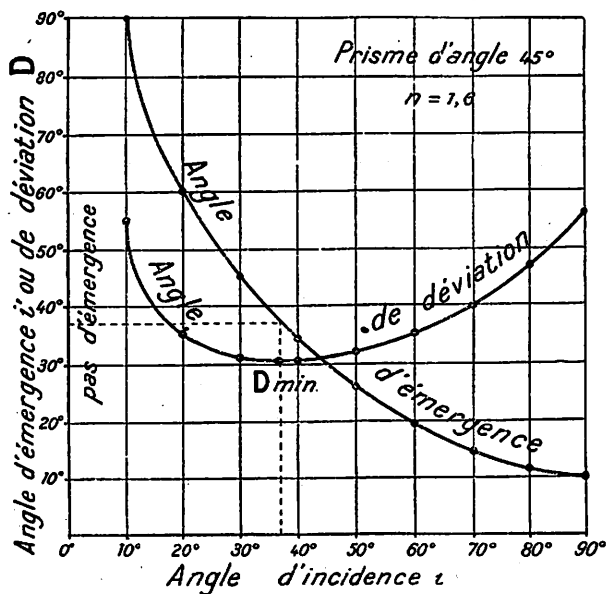


Fig. 63.

de déviation devrait, en vertu de la loi du retour inverse de la lumière, se reproduire pour un angle d'incidence i' (angle d'émergence i). L'existence d'un seul minimum montre qu'au minimum de déviation i est égal à i' .

*49. DÉTERMINATION DE L'INDICE DE RÉFRACTION.

— La mesure de la déviation minimum D_m et de l'angle A du prisme permet de déterminer, avec une grande précision, l'indice de réfraction n du prisme. En effet, à la déviation minimum D_m , l'angle d'incidence i est égal à l'angle d'émergence i' et, par conséquent, les angles r et r' sont égaux. Nous avons donc :

$$A = 2r \quad \text{et} \quad r = \frac{A}{2}$$

$$D_m = 2i - A \quad \text{et} \quad i = \frac{D_m + A}{2}$$

L'indice de réfraction n de la substance qui constitue le prisme est donc :

$$n = \frac{\sin i}{\sin r}; \quad n = \frac{\sin \frac{D_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}}$$

Pour déterminer l'indice de réfraction d'un solide transparent, nous y taillons un prisme dont l'angle est mesuré avec soin et nous déterminons la déviation minimum. Pour déterminer l'indice de réfraction d'un liquide, nous le plaçons dans un prisme creux limité par deux lames de verre et nous procédons comme pour les solides.

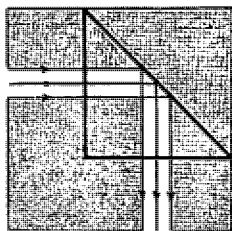


Fig. 64.

50. PRISME A RÉFLEXION TOTALE. — Considérons un prisme de verre dont la section principale constitue un triangle rectangle isocèle (fig. 64). Les rayons lumineux qui pénètrent dans le prisme normalement à la face d'entrée se présentent sur la face hypoténuse sous un angle supérieur à l'angle limite qui vaut 42° . Les rayons lumineux y subissent donc la réflexion totale et émergent du prisme normalement à la face de sortie. Ce prisme, qui joue le rôle de miroir plan, est un prisme à réflexion totale.

Les prismes à réflexion totale sont utilisés, au lieu de miroirs plans, dans de nombreux appareils d'optique: chambres claires à dessiner, périscoptes, télescopes,...

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Indiquer les valeurs de i, i', r, r' et D pour un prisme d'indice 1,5 et d'angle 50° dans les cas suivants : a) incidence rasante; b) incidence de 45° ; c) incidence nulle; d) émergence rasante; e) émergence de 45° ; f) déviation minimum.

SOLUTION. — L'application des formules donne successivement :

a) $i = 90^\circ$;	$\sin i = n \sin r$;	$\sin r = \frac{\sin 90^\circ}{1,5} = \frac{2}{3}$;	$r = 41^\circ 45'$
	$A = r + r'$;	$r' = 50^\circ - 41^\circ 45'$;	$r' = 8^\circ 15'$
	$\sin i' = n \sin r'$;	$\sin i' = 1,5 \sin 8^\circ 15' = 0,2152$;	$i' = 12^\circ 25'$
	$D = i + i' - A$;	$D = 90^\circ + 12^\circ 25' - 50^\circ$;	$D = 52^\circ 25'$
b) $i = 45^\circ$;		$\sin r = \frac{\sin 45^\circ}{1,5} = 0,471$;	$r = 28^\circ 7'$
		$r = 50^\circ - 28^\circ 7'$;	$r' = 21^\circ 53'$
		$\sin i' = 1,5 \sin 21^\circ 53' = 0,555$;	$i' = 33^\circ 45'$
		$D = 45^\circ + 33^\circ 45' - 50^\circ$;	$D = 28^\circ 45'$
c) $i = 0^\circ$;		$\sin r = \frac{\sin 0^\circ}{1,5} = 0$;	$r = 0^\circ$
		$r' = 50^\circ - 0^\circ$;	$r' = 50^\circ$
		$\sin i' = 1,5 \sin 50^\circ = 1,149$;	pas émergence.
d) $i' = 90^\circ$;	$r' = 41^\circ 15'$;	$r = 8^\circ 15'$;	$i = 12^\circ 25'$;
			$D = 52^\circ 25'$
e) $i' = 45^\circ$;	$r' = 28^\circ 7'$;	$r = 21^\circ 53'$;	$i = 33^\circ 45'$;
			$D = 28^\circ 45'$

A la déviation minimum : $i = i'$ et $r = r' = \frac{A}{2}$.

$r = r' = 25^\circ$; $\sin i = \sin i' = 1,5 \sin 25^\circ = 0,633$; $i = i' = 39^\circ 17'$

§ 3. MILIEUX RÉFRINGENTS A FACES COURBES.

51. DÉFINITIONS. — Un milieu réfringent transparent limité par des surfaces sphériques constitue une lentille. Généralement, les

lentilles sont en flint-glass (indice de réfraction : 1,6 à 1,7) ou en crown-glass (indice de réfraction : 1,5). Nous distinguerons deux catégories de lentilles : les lentilles convergentes et les lentilles divergentes.

1^o) Les **lentilles convergentes** ou lentilles à bords minces transforment un faisceau lumineux parallèle en faisceau lumineux convergent. Elles se présentent sous forme de lentilles biconvexes, de lentilles plan-convexes et de ménisques convergents (fig. 65). Nous représenterons les lentilles convergentes par un segment de droite terminé par deux triangles dont les bases se font face (fig. 65).

2^o) Les **lentilles divergentes** ou lentilles à bords épais transforment un faisceau lumineux parallèle en faisceau lumineux divergent.

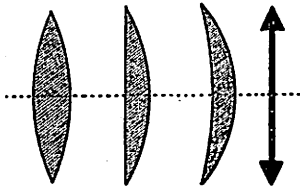


Fig. 65.

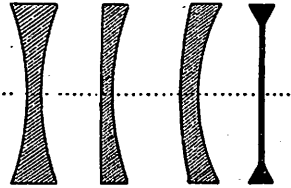


Fig. 66.

Elles se présentent sous forme de lentilles biconcaves, de lentilles plan-concaves et de ménisques divergents (fig. 66). Nous représenterons les lentilles divergentes par un segment de droite terminé par deux triangles dont les sommets se font face (fig. 66).

Nous appellerons **centres de courbure** et **rayons de courbure** les centres C et les rayons R des surfaces sphériques limitant la lentille; **axe principal** de la lentille, la droite joignant les centres de courbure; **section principale** de la lentille, tout plan passant par

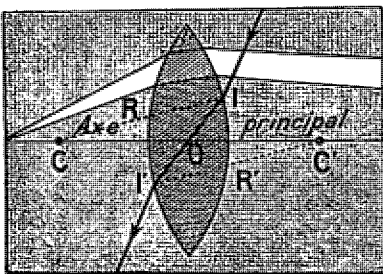


Fig. 67.

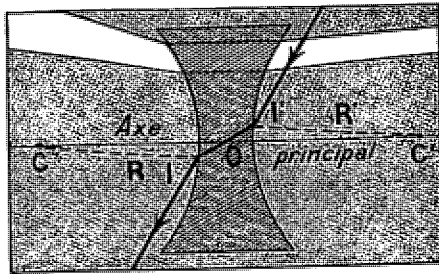


Fig. 68.

l'axe principal; **centre optique** de la lentille, le point de rencontre O de l'axe principal avec le segment II' joignant les extrémités I et I' de deux rayons de courbure parallèles (fig. 67 et 68).

Nous ne considérerons que les **lentilles minces** afin de pouvoir négliger l'épaisseur de la lentille et que des **rayons lumineux faiblement inclinés sur l'axe principal**.

52. PROPRIÉTÉ DU CENTRE OPTIQUE.

Expérience. — Faisons tomber sur une lentille un étroit faisceau lumineux parallèle dont la direction passe par le centre optique. Nous observons que le faisceau ne subit pratiquement aucune déviation.

Conclusion. — **Tout rayon lumineux passant par le centre optique d'une lentille mince ne subit aucune déviation.**

***Étude analytique.** — Considérons une lentille convergente ou divergente de centres de courbure C et C' (fig. 67 et 68). De ces points, menons les deux rayons parallèles CI et $C'I'$. Joignons les points I et I' : le segment II' coupe l'axe principal au point O qui est, par définition, le centre optique de la lentille.

Parmi tous les rayons lumineux incidents en I , il en existe un qui traverse la lentille en suivant la direction II' . Pour ce rayon, la lentille se comporte comme une lame à faces parallèles puisque les plans tangents à la lentille en I et en I' sont parallèles. Le rayon incident et le rayon émergent sont donc parallèles (n° 41). Puisque la lentille est mince, le déplacement latéral est négligeable : le rayon traverse la lentille sans déviation.

Tous les rayons qui jouissent de la propriété de traverser la lentille sans subir de déviation passent par le centre optique O . En effet, les triangles semblables COI et $C'OI'$ donnent :

$$\frac{CO}{C'O} = \frac{CI}{C'I'} = \frac{R}{R'} = C^te$$

Le point O divise donc le segment CC' en deux parties dont le rapport est constant. Ce point O est le même quels que soient les rayons CI et $C'I'$ envisagés.

53. PROPRIÉTÉ DU FOYER.

Expériences. — Faisons tomber sur l'une des faces d'une lentille convergente trois faisceaux lumineux parallèles à l'axe principal. Nous observons

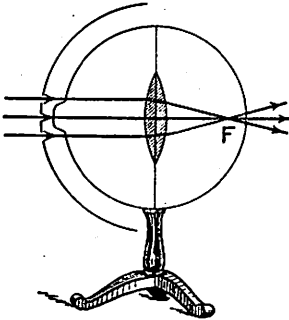


Fig. 69.

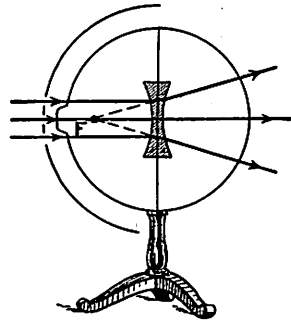


Fig. 70.

que les faisceaux convergent, après réfraction, en un point F situé sur l'axe principal (fig. 69). Ce point constitue un foyer réel. La distance séparant le

foyer du centre optique est dite distance focale. Faisons tourner le disque de 180° ; les faisceaux lumineux tombent sur l'autre face de la lentille et convergent, après réfraction, en un second foyer situé à la même distance de la lentille que le premier.

Recommençons les mêmes expériences avec une lentille divergente. Nous observons que les faisceaux parallèles divergent, après réfraction, d'un point F qui constitue un foyer virtuel (fig. 70). Il en est de même pour l'autre face de la lentille.

Conclusion. — Tout rayon lumineux parallèle à l'axe principal d'une lentille se réfracte en passant réellement ou virtuellement par le foyer.

Réciproquement, tout rayon lumineux passant réellement ou virtuellement par le foyer devient, après réfraction, parallèle à l'axe principal.

Remarque. — Des faisceaux lumineux parallèles légèrement inclinés sur l'axe principal convergent réellement ou virtuellement, après réfraction dans une lentille, en un point appelé **foyer secondaire**.

***Étude analytique.** — Considérons une lentille de faible épaisseur (fig. 71). Le rayon lumineux SI, parallèle à l'axe principal, après avoir subi la réfraction à l'entrée et à la sortie de la lentille, l'axe principal au point F. Aux points I et I', menons les rayons

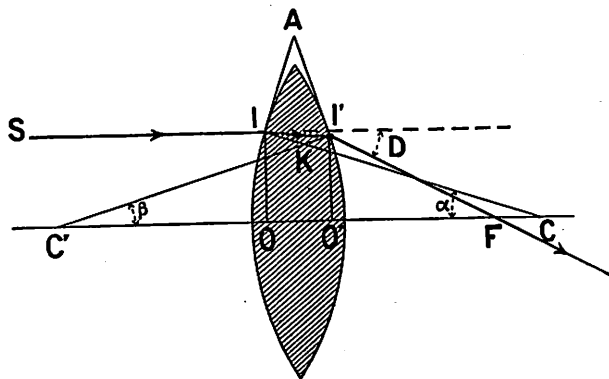


Fig. 71.

IC et $I'C'$; menons-y également les plans tangents à la lentille. Ces plans forment entre eux l'angle dièdre A. Le rayon lumineux considéré a traversé la lentille comme s'il avait traversé un prisme d'angle A. Désignons par α et β les angles que font avec l'axe principal les rayons IC et $I'C'$. Le triangle CKC' donne :

$$\alpha + \beta + CKC' = 2 \text{ Droits.}$$

Le quadrilatère inscriptible $IAI'K$ donne :

$$A + IKI' = 2 \text{ Droits.}$$

D'où nous tirons :

$$A = \alpha + \beta. \quad (1)$$

En confondant les angles α et β , exprimés en radians, avec leurs sinus correspondants puisque ces angles sont petits, nous obtenons, R et R' désignant les rayons de courbure de la lentille :

$$\alpha = \frac{IO}{IC} = \frac{IO}{R} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{I'O'}{I'C'} = \frac{I'O'}{R'}$$

Remplaçons dans la relation (1) α et β par leurs valeurs respectives, nous obtenons :

$$A = \frac{IO}{R} + \frac{I'O'}{R'}$$

D'autre part, l'angle A du prisme auquel peut être assimilée la lentille est petit puisque la lentille est de faible épaisseur. Dans ces conditions, la déviation D subie par le rayon lumineux est (n° 45) :

$$D = (n - 1) A; \quad D = (n - 1) \left(\frac{IO}{R} + \frac{I'O'}{R'} \right). \quad (2)$$

Mais le triangle rectangle $FO'I'$ donne une autre expression de la déviation D , l'angle D étant également petit :

$$D = \frac{I'O'}{O'F}; \quad D = \frac{I'O'}{f}. \quad (3)$$

Remarquons que IO est très sensiblement égal à $I'O'$ puisque la lentille est mince; égalons les relations (2) et (3); nous obtenons, en simplifiant par $I'O'$:

$$(n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = \frac{1}{f}$$

Cette relation générale montre que la distance focale f d'une lentille a une valeur bien déterminée qui ne dépend que de l'indice de réfraction de la lentille et des rayons de courbure. Cette valeur est indépendante du point d'incidence et de la face d'entrée.

Remarque. — En particulier, pour une lentille en crown ($n = 1,5$)

a) si les rayons de courbure sont égaux, il vient :

$$\frac{1}{f} = (1,5 - 1) \cdot \frac{2}{R}; \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{R}; \quad f = R$$

La distance focale est égale au rayon de courbure de la lentille.

b) si la lentille est plan-convexe, il vient :

$$\frac{1}{f} = (1,5 - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\infty} \right); \quad \frac{1}{f} = \frac{0,5}{R}; \quad f = 2R$$

La distance focale est égale au double du rayon de courbure de la face convexe.

54. CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE L'IMAGE D'UN POINT. — Soit à construire l'image d'un point A formée par la lentille convergente L (fig. 72). Le rayon AI parallèle à l'axe

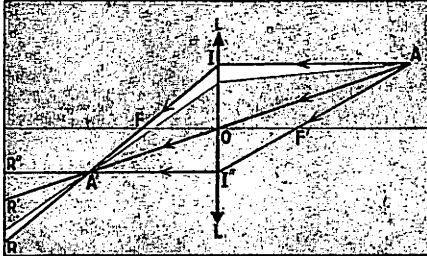


Fig. 72.

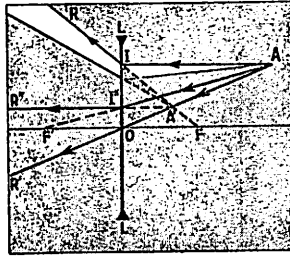


Fig. 73

optique passe, après réfraction, par le foyer F; l'image du point A est sur le rayon réfracté IR. Le rayon AO passant par le centre optique O ne subit pas de déviation; l'image du point A est sur le rayon réfracté OR'. Le point A', qui est à l'intersection des rayons réfractés IR et OR', est l'image du point A.

La construction géométrique de l'image d'un point formée par une lentille divergente est analogue à celle de la lentille convergente en remarquant toutefois que ce sont les prolongements des rayons réfractés qui convergent au point image (fig. 73).

55. CONSTRUCTION GÉOMÉTRIQUE DE L'IMAGE D'UN OBJET. — L'image d'un objet formée par une lentille est le lieu géométrique des images des points qui constituent l'objet. Soit à construire l'image de la flèche AB perpendiculaire à l'axe

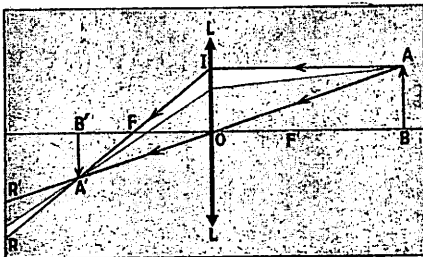


Fig. 74

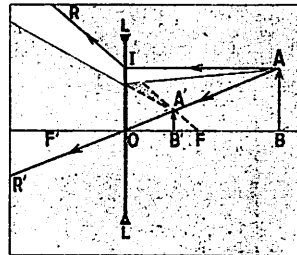


Fig. 75.

principal d'une lentille (fig. 74 et 75). Nous construisons l'image A' du point A et nous obtenons l'image B' du point B en abaissant la perpendiculaire A' B' sur l'axe principal. L'image de la flèche AB est la flèche A' B'.

56. IMAGES FORMÉES PAR LES LENTILLES.

Construction géométrique. — Nous pouvons étudier, par la construction géométrique, les variations de position et de grandeur de l'image d'un objet qui se déplace devant une lentille. Lorsque l'objet se déplace de l'infini jusqu'à la lentille, nous remarquons que, pour tout point de l'objet, la direction du rayon parallèle à l'axe principal ne change pas tandis que la direction du rayon passant par le centre optique change constamment. Il en résulte qu'il existe, pour toute position de l'objet, une image correspondante.

Nous remarquons (fig. 76 et 77) :

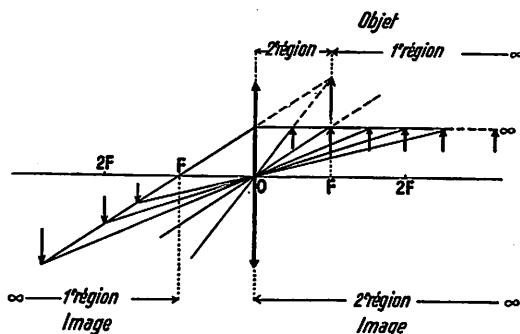


Fig. 76.

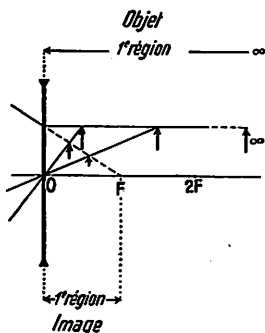


Fig. 77.

Lorsque l'objet se déplace de l'infini au foyer d'une **lentille convergente**, l'image, réelle, se déplace du foyer à l'infini (1^{re} région).

Lorsque l'objet se déplace du foyer à la lentille, l'image, virtuelle, se déplace de l'infini à la lentille (2^e région).

Nous donnerons au n° 58 une méthode graphique permettant de retrouver facilement la position et les propriétés des images que nous fournit la construction géométrique.

Vérification expérimentale. — Nous vérifions aisément les résultats obtenus par la construction géométrique en faisant voyager une bougie le long de l'axe principal d'une lentille.

Lorsque la bougie se trouve entre l'infini et le foyer d'une **lentille convergente**, nous recevons l'image sur un écran : l'image est donc réelle (fig. 78). Cette image, qui est

Lorsque l'objet se déplace de l'infini à la **lentille divergente**, l'image, sans cesse virtuelle, se déplace du foyer à la lentille.

Quelle que soit la position de la bougie devant une **lentille divergente**, nous ne pouvons pas recevoir l'image sur un écran mais, en nous plaçant devant la lentille, nous

renversée, est plus petite ou plus grande que l'objet selon que ce dernier est situé entre l'infini et le double de la distance focale ou entre

observons l'image : cette image est virtuelle, droite, plus petite que l'objet (fig. 80).



Fig. 78.

le double de la distance focale et le foyer.

Lorsque la bougie se trouve entre le foyer et la lentille, nous ne pouvons plus recevoir l'image sur un

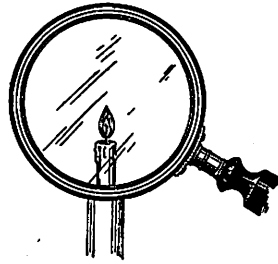


Fig. 80.

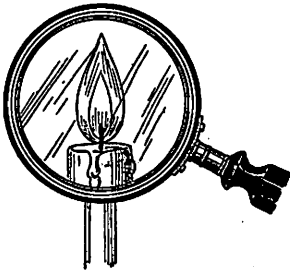


Fig. 79.

écran, mais, en nous plaçant devant la lentille, nous observons l'image : cette image est virtuelle, droite, plus grande que l'objet (fig. 79).

***Étude analytique.** — La détermination de la position et de la grandeur de l'image d'un objet par la construction géométrique est longue et pénible. Ne pourrait-on pas déterminer les propriétés de l'image par l'application simple et rapide d'une formule algébrique ?

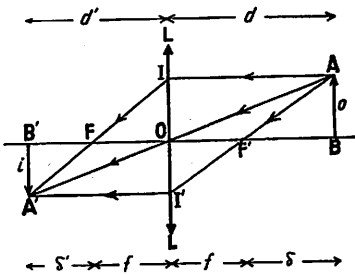


Fig. 81.

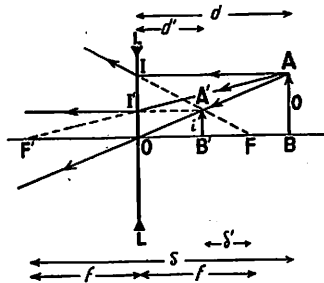


Fig. 82.

Considérons, à cet effet, l'image A'B' d'un objet AB formée par une lentille (fig. 81 et 82). Pour simplifier les notations, désignons

par o la grandeur de l'objet AB , par i la grandeur de l'image $A'B'$, par d la distance OB de l'objet à la lentille, par d' la distance OB' de l'image à la lentille, par f la distance focale OF de la lentille.

Les triangles semblables $A'OB'$ et AOB nous donnent :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OB'}{OB} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{d'}{d} \quad (1)$$

Les triangles semblables $A'FB'$ et IFO nous donnent :
pour les lentilles convergentes pour les lentilles divergentes

$$\frac{A'B'}{IO} = \frac{FB'}{FO} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{f-d'}{f} \quad (2)$$

Egalons les relations (1) et (2), nous obtenons successivement :
pour les lentilles convergentes pour les lentilles divergentes

$$\frac{d'}{d} = \frac{d'-f}{f} \quad \text{ou} \quad \frac{d'}{d} = \frac{f-d'}{f}$$

$$d'f = dd' - df \quad \text{ou} \quad d'f = df - dd'$$

$$d'f + df = dd' \quad \text{ou} \quad d'f - df = -dd'$$

Divisons par le produit $dd'f$;
nous obtenons :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Divisons par le produit $dd'f$,
nous obtenons :

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = -\frac{1}{f} \quad (3)$$

Les relations (3) permettent de calculer la position de l'image en fonction de la position de l'objet; elles constituent les relations de position. La relation (1) permet de calculer la grandeur de l'image en fonction de la grandeur de l'objet; elle constitue la relation de grandissement.

***57. FORMULES DES LENTILLES.** — Les relations

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

et

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{d'}{d}$$

(1) On donne parfois une autre forme aux formules des lentilles.
Les triangles semblables $A'FB'$ et IFO donnent : (fig. 81 et 82)

$$\frac{A'B'}{IO} = \frac{B'F}{OF} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{f-d'} \quad (1)$$

sont les formules des lentilles. Ces formules permettent de déterminer la position et les propriétés des images données par les lentilles à condition de convenir que les grandeurs d , d' et f sont positives s'il s'agit d'objets, images et foyers réels et négatives s'il s'agit d'objets, images et foyers virtuels. Puisque les lentilles réfractent la lumière, il en résulte que les grandeurs d , d' et f sont de même signe ou de signes contraires selon que ces grandeurs sont situées de part et d'autre ou du même côté de la lentille.

D'après ces conventions,

$f > 0$	lentille convergente	$f < 0$	lentille divergente
$d > 0$	objet réel	$d < 0$	objet virtuel
$d' > 0$	image réelle	$d' < 0$	image virtuelle
$\gamma > 0$	image renversée	$\gamma < 0$	image droite

La discussion algébrique des formules des lentilles permet de retrouver tous les résultats obtenus par construction géométrique.

58. GRAPHIQUES DE LISSAJOUS. — Une méthode graphique élégante permet de prévoir aisément la position et les propriétés des images données par les lentilles.

Traçons deux axes perpendiculaires : l'un horizontal représente la distance d de l'objet à la lentille, l'autre vertical représente la distance d' de l'image à la lentille. Déterminons préalablement le point A d'abscisse et d'ordonnée égales à la distance focale f comptée positivement dans le cas des lentilles convergentes (fig. 83) et négativement dans le cas d'une lentille divergente (fig. 84). Pour trouver la distance d' de l'image à la lentille, portons sur l'axe OX la distance d ($d = OB$) de l'objet à la lentille, joignons le point A au point B par un segment de droite et prolongeons, s'il y a lieu, le segment de droite AB jusqu'au point C de l'axe des ordonnées : la distance OC est la distance d' ($d' = OC$) de l'image à la lentille.

Les triangles semblables $AF'B$ et $F'O$ donnent

$$\frac{F'O}{AB} = \frac{OF'}{BF'} \quad \text{ou} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{s} \quad (2)$$

En égalant les relations (1) et (2), nous obtenons :

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{s'}{f} = \frac{f}{s} \quad (3)$$

et

$$s s' = f^2 \quad (4)$$

Les relations (3) et (4) sont connues sous le nom d'équations de Newton.

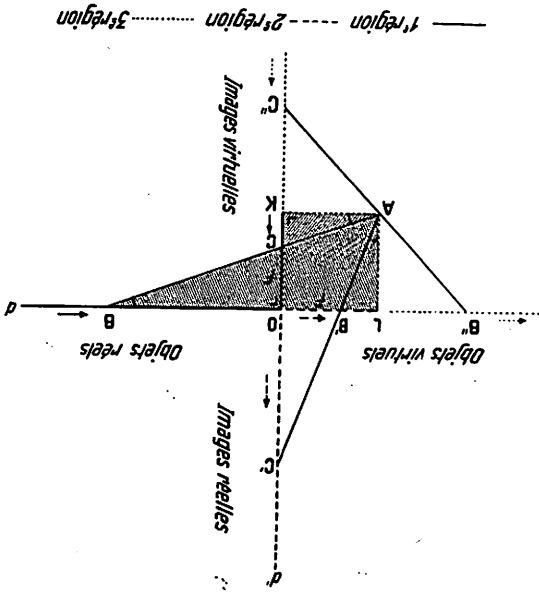


FIG. 83.

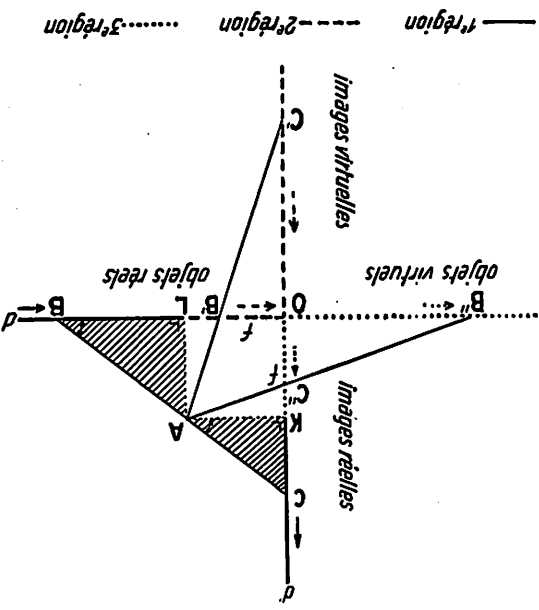


FIG. 84.

* Cette méthode se justifie aisément ⁽¹⁾ : le rapport de similitude

$$\frac{CK}{AL} = \frac{AK}{BL}$$

des triangles semblables AKC et BLA (fig. 83 et 84) donnent

$$\frac{d' - f}{f} = \frac{f}{d - f} \qquad \frac{f - d'}{f} = \frac{f}{d + f}$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f} \qquad \frac{1}{d} - \frac{1}{d'} = -\frac{1}{f}$$

Nous retrouvons la relation de position des lentilles. *

Le graphique se rapportant à la **lentille convergente** permet de considérer trois régions (fig. 83) :

1^{re} région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de ∞ à f . L'image se déplace de f à ∞ ; elle est réelle ($d' > 0$) et renversée ($\gamma > 0$).

2^e région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de f à O .

Le graphique se rapportant à la **lentille divergente** permet de considérer trois régions (fig. 84) :

1^{re} région. — L'objet réel ($d > 0$) se déplace de ∞ à f . L'image se déplace de f à O ; elle est virtuelle ($d' < 0$) et droite ($\gamma < 0$).

(2^e région.)⁽²⁾ — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de O à $-f$.

(1) La méthode graphique permet de retrouver la formule de position de Newton :

$$\frac{CK}{AL} = \frac{AK}{BL}; \quad \frac{s'}{f} = \frac{f}{s}; \quad ss' = f^2$$

(2) L'image AB que donnerait d'un objet la lentille L₁ joue le rôle d'objet virtuel vis-à-vis de la lentille L₂. Parmi les rayons qui convergeraient au point A, le rayon parallèle à l'axe principal passe réellement ou virtuellement par le foyer F₂ de la lentille L₂; le rayon passant par le centre optique O₂ de la lentille L₂ ne subit pas de déviation. Le point de rencontre A' des rayons réfractés par la lentille L₂ est l'image du point A.

On vérifie expérimentalement les résultats de la construction géométrique en disposant entre une lentille convergente L₁ et l'image réelle AB une lentille L₂. On observe que :

1^o) dans le cas où la lentille L₂ est convergente, l'image A'B' est réelle (fig. 85);

2^o) dans le cas où la lentille L₂ est divergente, l'image A'B' est virtuelle (fig. 86) ou réelle (fig. 87).

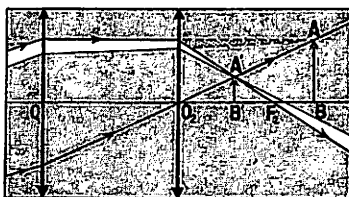


Fig. 85.



Fig. 86.

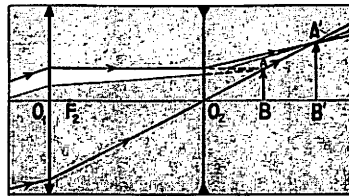


Fig. 87.

L'image se déplace de $-\infty$ à 0; elle est virtuelle ($d' < 0$) et droite ($\gamma < 0$).

3^e région. (1) — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de 0 à $-\infty$. L'image se déplace de 0 à f ; elle est réelle ($d' > 0$) et droite ($\gamma < 0$).

L'image se déplace de 0 à ∞ , elle est réelle ($d' > 0$) et droite ($\gamma < 0$).

3^e région. (1) — L'objet virtuel ($d < 0$) se déplace de $-f$ à $-\infty$. L'image se déplace de $-\infty$ à $-f$; elle est virtuelle ($d' < 0$) et renversée ($\gamma > 0$).

59. DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA DISTANCE FOCALE DES LENTILLES.

A) Lentille convergente. — Pour déterminer la distance focale d'une lentille convergente, nous faisons tomber sur cette lentille un faisceau lumineux parallèle provenant d'une source éloignée. Nous recherchons la position à donner à un écran pour que l'image de la source s'y forme avec le maximum de netteté. La distance qui sépare la lentille de l'écran est la distance focale de la lentille. L'objet étant à l'infini, nous avons :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{\infty} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad f = d'$$

Nous pouvons aussi, en déplaçant une bougie et un écran le long de l'axe principal de la lentille, déterminer par tâtonnement les positions de la bougie et de l'écran telles que nous ayons image et objet situés à égale distance de la lentille (fig. 78). Cette distance est égale au double de la distance focale de la lentille: puisque $d' = d$, nous avons :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f}; \quad \frac{-2}{d} = \frac{1}{f}; \quad d = 2f.$$

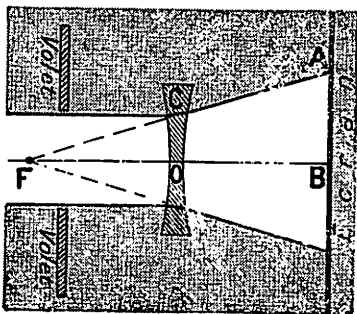


Fig. 88.

à un écran pour y recevoir un cercle lumineux dont le diamètre soit double du diamètre de l'ouverture du volet. La considération des triangles semblables AFB et CFO montre que la distance BO qui sépare la lentille de l'écran mesure la distance focale FO de la lentille.

B) Lentille divergente. — Pour déterminer la distance focale d'une lentille divergente, nous faisons tomber sur cette lentille un faisceau lumineux cylindrique passant par une ouverture circulaire pratiquée dans un volet (fig. 88). Nous déterminons la position qu'il faut donner

60. CONVERGENCE D'UNE LENTILLE. — Nous appellerons **convergence** d'une lentille la quantité $1/f$, inverse de la distance focale. L'unité de convergence choisie est la **dioptrie** qui est, par définition, la convergence d'une lentille de 1 mètre de distance focale.

Exemples : une lentille convergente de 25 cm de distance focale a une convergence de $1/0,25$ c'est-à-dire de 4 dioptries; une lentille divergente de -20 cm de distance focale a une convergence de $-1/0,20$ c'est-à-dire de -5 dioptries.

(1) Voir note 2 de la page 59.

61. ASSOCIATION DE LENTILLES. — L'association de plusieurs lentilles centrées sur le même axe équivaut à une lentille unique dont la convergence est égale à la somme des convergences des lentilles constituant l'association :

$$\frac{1}{f_a} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots = \Sigma \frac{1}{f}$$

Exemple : Une association formée d'une lentille de 5 dioptries et d'une lentille de — 3 dioptries a une convergence de 2 dioptries.

62. DÉFAUTS DES LENTILLES.

Aberration de sphéricité. — Nous avons admis que les rayons parallèles à l'axe principal convergent, après réfraction à travers une lentille, en un même point : le foyer. Il n'en est pas rigoureusement ainsi : en effet, faisons tomber une série de faisceaux parallèles sur une lentille convergente fixée sur le disque optique; nous observons qu'après réfraction les rayons marginaux coupent l'axe principal en des points plus rapprochés de la lentille que les rayons centraux (fig. 89). Les rayons parallèles à l'axe principal se coupent, après réfraction, sur une surface appelée **caustique de réfraction**. Ce défaut nuit beaucoup à la netteté des images données par les lentilles.

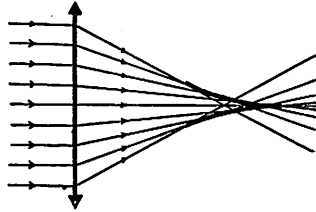


Fig. 89.

Nous y parons :

1^o) en **diaphragmant** le faisceau incident c'est-à-dire en interceptant, au moyen d'un écran percé d'une ouverture centrale, les rayons qui tombent sur les bords de la lentille (fig. 90). Toutefois si l'image augmente de netteté, elle perd en intensité lumineuse.



Fig. 90.

2^o) en **substituant à la lentille unique un système de deux lentilles** présentant des courbures convenables. C'est ce moyen qu'on utilise dans les appareils de photographie et de projection pour conserver à l'image le maximum d'intensité lumineuse.

3^o) en **employant des lentilles à échelons.** — Le faisceau issu d'une source lumineuse placée au foyer d'une lentille convergente ne se transforme pas, à cause de l'aberration de sphéricité, en un faisceau rigoureusement parallèle. Il en résulte que l'éclaircissement diminue rapidement avec la distance. Pour obvier à cet inconvé-

nient, on utilise, dans les phares, la lentille à échelons imaginée par Fresnel (physicien français : 1786-1827). La lentille à échelons

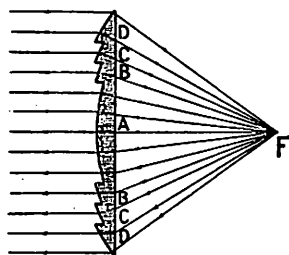


Fig. 91

comporte une lentille centrale A entourée d'anneaux circulaires B, C, D appelés échelons (fig. 91). Les courbures de ces diverses parties ont été calculées de façon que la lentille centrale et les échelons aient même foyer. Le faisceau émergent, fourni par une source lumineuse disposée au foyer de la lentille à échelons, est rigoureusement parallèle : ce fait a pour effet d'augmenter la portée. La portée d'un phare maritime actuel est de l'ordre de vingt-cinq kilomètres.

Aberration d'astigmatisme. — Un faisceau parallèle fortement incliné sur l'axe principal ne converge pas, après réfraction à travers une lentille, en un point unique. Les rayons émergents se rencontrent en des points situés sur deux droites perpendiculaires inégalement distantes de la lentille (fig. 41). Ces droites sont appelées **lignes focales**. On remédie à ce défaut, connu sous le nom d'aberration d'astigmatisme, en diaphragmant le faisceau incident de manière à éliminer les rayons trop obliques à l'axe principal ou en utilisant des systèmes de lentilles dits systèmes **anastigmats**.

Aberration de chromatisme. — Nous avons, au cours de notre étude, remarqué l'irisation des bords des images produites par les lentilles en lumière blanche. Ce défaut est dû à la dispersion de la lumière blanche (n° 43) lors de son passage à travers les lentilles : puisque l'indice de réfraction n varie avec la couleur de la lumière, la distance focale f qui est fonction de l'indice de réfraction n

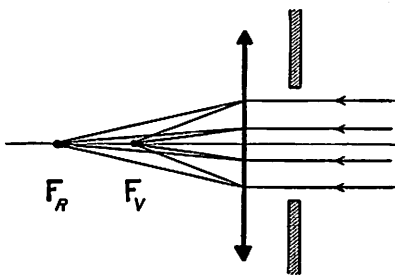


Fig. 92.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right)$$

varie aussi avec la couleur de la lumière.

Le foyer d'une lentille en lumière rouge est différent du foyer en lumière violette (fig. 92). L'image rouge ne se superpose pas à l'image violette : il y a donc, en lumière blanche, irisation des images. Ce défaut est appelé aberration de chromatisme. Nous diminuons l'aberration de chromatisme par l'emploi d'un système de deux lentilles accolées : l'une convergente en crown et l'autre divergente en flint. Un tel système de lentilles est dit **achromatique**.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Déterminer les propriétés de l'image que donne d'un objet situé à 1,5 m une lentille dont la convergence est de 4 dioptries.

SOLUTION. — $f = 25$ cm; $d = 150$ cm.

La relation : $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$ donne :

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}; \quad \frac{1}{d'} = \frac{1}{25} - \frac{1}{150}; \quad \frac{1}{d'} = \frac{5}{150}; \quad d' = 30 \text{ cm.}$$

La relation de grandissement donne :

$$\gamma = \frac{d'}{d}; \quad \gamma = \frac{30}{150}; \quad \gamma = \frac{1}{5}$$

L'image, qui est située à 30 cm de la lentille, est réelle, renversée, égale en grandeur à 1/5 de l'objet.

2. Déterminer les propriétés de l'image que donne d'un objet situé à 1,5 m une lentille dont la convergence est de - 4 dioptries.

SOLUTION. — $f = - 25$ cm; $d = 150$ cm.

La relation : $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$ donne :

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}; \quad \frac{1}{d'} = -\frac{1}{25} - \frac{1}{150}; \quad \frac{1}{d'} = -\frac{7}{150}; \quad d' = - 21,4 \text{ cm.}$$

La relation de grandissement donne :

$$\gamma = \frac{d'}{d}; \quad \gamma = \frac{-\frac{150}{7}}{150}; \quad \gamma = -\frac{1}{7}$$

L'image, qui est située à 21,4 cm de la lentille, est virtuelle, droite, plus petite que l'objet.

3. Déterminer la position de l'image que donnent d'un objet une lentille convergente (convergence : 2 dioptries) et une lentille divergente (convergence : - 4 dioptries) distantes l'une de l'autre de 0,25 m. L'objet est situé à 75 cm de la lentille convergente.

SOLUTION. — Considérons d'abord la lentille convergente. La relation : $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$ donne :

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}; \quad \frac{1}{d'} = \frac{1}{50} - \frac{1}{75}; \quad \frac{1}{d'} = \frac{1}{150}; \quad d' = 150 \text{ cm.}$$

La lentille convergente donnerait une image réelle, située à 150 cm de cette lentille. Cette image réelle constitue pour la lentille divergente un objet virtuel situé à 125 cm de cette lentille. La relation : $\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$ donne :

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d}; \quad \frac{1}{d'} = -\frac{1}{25} + \frac{1}{125}; \quad \frac{1}{d'} = -\frac{4}{125}; \quad d' = - 31,25 \text{ cm.}$$

L'image donnée par le système des lentilles est virtuelle, elle est située à - 6,25 cm de la lentille convergente et - 31,25 cm de la lentille divergente. Contrôler par la construction géométrique.

EXERCICES NUMÉRIQUES

1. Un rayon lumineux passe du sulfure de carbone ($n = 5/3$) dans le verre ($n = 3/2$). Construire le rayon réfracté. Calculer : a) l'angle de réfraction pour une incidence de 30° ; b) l'angle limite d'incidence. R : a) $r = 34^\circ$; b) $l = 65^\circ$.

2. Un bouchon, ayant la forme d'un disque circulaire de 16 cm de diamètre, flotte sur l'eau ($n = 4/3$). Il porte, dirigée vers le bas, une longue tige enfoncée perpendiculairement en son centre. a) Déterminer la partie de la tige non visible à travers la surface de séparation; b) Calculer l'indice de réfraction du chloroforme sachant que, lorsqu'on remplace l'eau par le chloroforme, la partie non visible de la tige est de 9 cm. R : a) 7,05 cm.; b) 1,5.

3. Un récipient renferme de l'eau ($n = 4/3$) et de la benzine ($n = 3/2$); les hauteurs des colonnes liquides sont respectivement de 20 cm et de 15 cm. A quelle profondeur à partir de la surface libre de la benzine apparaîtra le fond du récipient observé perpendiculairement à la surface libre. R : 25 cm.

4. Dans un microscope à vis micrométrique, on met au point quelques poussières du porte-objet. On recouvre ensuite celles-ci d'une lame de verre à faces parallèles. Pour voir nettement les poussières, il faut relever le tube du microscope de 0,96 mm; pour voir nettement la face supérieure de la lame de verre, il faut encore relever le microscope de 1,54 mm. Calculer l'indice de réfraction de la lame de verre. R : 1,62.

5. Calculer le déplacement latéral que subit un rayon lumineux traversant sous une incidence de 60° une vitre dont l'épaisseur est de 2 mm. (Indice de réfraction de la vitre : 1,5). R : 1 mm.

6. On demande les valeurs de l'angle d'incidence i , de l'angle d'émergence i' ainsi que la déviation D d'un rayon monochromatique traversant un prisme d'angle 60° et d'indice $\sqrt{2}$ dans les cas suivants :

a) incidence rasante. R : $i = 90^\circ$; $i' = 21^\circ 30'$; $D = 51^\circ 30'$.

b) incidence 30° . R : $i = 30^\circ$; $i' = 63^\circ 15'$; $D = 33^\circ 15'$

c) incidence normale. R : $i = 0^\circ$; pas d'émergence.

d) émergence rasante. R : $i = 21^\circ 30'$; $i' = 90^\circ$; $D = 51^\circ 30'$.

e) minimum de déviation. R : $i = i' = 45^\circ$; $D = 30^\circ$.

7. Un prisme isocèle dont les deux faces égales mesurent 5 cm et dont la base mesure 3 mm imprime à un rayon qui tombe normalement à une des faces une déviation de 2° . Calculer l'angle et l'indice de réfraction du prisme. R : $3^\circ 25'$; 1,615.

8. Un prisme P d'angle 30° et d'indice 1,8 est accolé à un second prisme P' d'angle 20° et d'indice 1,5, les arêtes des deux prismes coïncidant. Un rayon pénètre sous une incidence de 45° dans le prisme P. a) Indiquer la marche du rayon lumineux; b) calculer l'angle d'émergence i' ; c) calculer la déviation du rayon produite par le système. R : b) $i' = 45^\circ$; c) $D = 40^\circ$.

9. Le prisme P' du problème précédent est retourné de façon que son arête soit placée du côté de la base du prisme P. Un rayon pénètre normalement dans le prisme P. a) Indiquer la marche du rayon; b) calculer l'angle d'émergence; c) calculer la déviation du rayon produite par le système. R : b) $i' = 25^\circ 48'$; c) $D = 15^\circ 48'$.

10. Dans un prisme creux d'angle 60° servant à la détermination de l'indice de réfraction des liquides, on verse de l'alcool et on mesure l'angle minimum de déviation. Le résultat de cette mesure est 25° . Déterminer : a) l'indice de réfraction de l'alcool; b) l'angle d'incidence au minimum de déviation. R : a) 1,35; b) $42^\circ 30'$.

11. Un objet de 3 cm de hauteur et un écran sont à une distance invariable de 245 cm. Une lentille convergente projette sur l'écran une image renversée de l'objet de 75 cm de hauteur. Déterminer : a) la distance de l'objet à la lentille; b) la convergence de la lentille R : a) 9,4 cm; b) 11 dioptries.

12. a) A quelle distance d'une lentille biconvexe de rayons de courbure identiques et de convergence 2,5 dioptries faut-il placer un objet pour en avoir une image quatre fois plus grande? Interpréter les deux solutions. b) Déterminer les rayons de courbure de la lentille dont l'indice est 1,6. R : a) 30 cm et 50 cm; b) 48 cm.

13. A 60 cm d'une lentille plan-convexe L de 5 dioptries, on place un objet de 10 cm de hauteur perpendiculairement à l'axe principal de la lentille. On demande : a) la distance focale de la lentille; b) la position de l'image; c) la grandeur de l'image; d) le rayon de courbure de la face convexe, l'indice de réfraction étant 1,5. R : a) 20 cm; b) 30 cm; c) 5 cm; d) 10 cm.

14. Derrière la lentille plan-convexe L du problème précédent, on dispose une lentille biconcave L' de 10 cm de distance focale. On demande les caractéristiques de l'image obtenue a) lorsque la lentille L' se trouve à 10 cm de la lentille L; b) lorsque la lentille L' se trouve à 40 cm de la lentille L. R : a) image virtuelle, droite, à 20 cm de L'; b) image virtuelle, renversée, à 5 cm de L'.

15. Une source ponctuelle se trouve sur l'axe principal à 20,5 cm d'une lentille divergente. Le faisceau divergent émergeant de la lentille converge virtuellement en un point situé à 11,25 cm de la lentille. Calculer la distance focale de la lentille. R : 25 cm.

16. Deux lentilles convergentes sont centrées aux extrémités d'un tube métallique long de 50 cm. Un objet, placé à 25 cm de l'objectif de distance focale 15 cm a son image réelle, agrandie et droite sur un écran situé à 3 m de la seconde lentille. a) Faire la construction géométrique; b) calculer la convergence des lentilles; c) calculer le grandissement total. R. : b) 6,66 dioptries et 8,33 dioptries; c) 36.

17. Centrés sur un même axe, on dispose successivement un objet, une lentille convergente de 4 dioptries et un miroir convexe de 60 cm de rayon de courbure. L'objet se trouve à 50 cm de la lentille et à 90 cm du miroir. a) Calculer la position de l'image donnée par le système lentille-miroir; b) calculer le grandissement; c) indiquer les caractéristiques de l'image. R. : a) à 15 cm du miroir; b) $\gamma = 3/2$; c) réelle et renversée.

CHAPITRE IV.

ÉTUDE OPTIQUE DE L'ŒIL.

63. **STRUCTURE DE L'ŒIL** (fig. 93). — L'œil est un organe de forme globulaire limité par une enveloppe extérieure comprenant une membrane protectrice, dure et blanche : la **scélrotique** et une membrane pigmentée et vascularisée : la **choroïde**. En avant, la sclérotique bombée et transparente constitue la **cornée transparente** (indice: 1,336). La choroïde se détache de la sclérotique

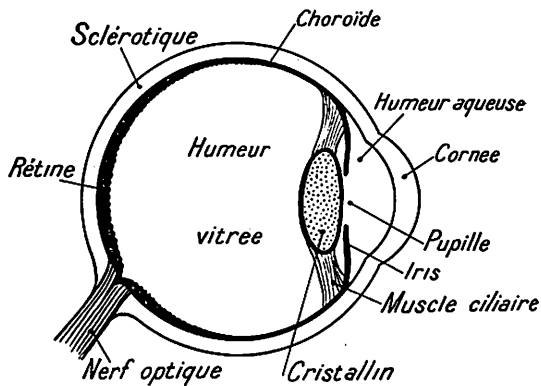


Fig. 93.

pour former une membrane opaque et colorée : l'**iris**, qui est percé d'une ouverture circulaire : la **pupille**.

La pupille se contracte sous l'influence d'une lumière vive et se dilate au contraire dans l'obscurité; elle joue donc le rôle de diaphragme. Immédiatement derrière l'iris se trouve un organe en forme de lentille biconvexe appelé **cristallin**. Le cristallin est constitué de feuillettes élastiques superposés, inégalement réfringents (indice variant de 1,377 à 1,399). La face antérieure du cristallin est moins convexe que la face postérieure. La courbure du cristallin peut être modifiée sous l'action des **muscles ciliaires** qui s'insèrent sur la sclérotique. Le cristallin partage l'œil en deux chambres : la chambre antérieure comprise entre la cornée et le cristallin est remplie d'un

liquide transparent : l'**humeur aqueuse** (indice : 1,336); la chambre postérieure contient une matière transparente et gélatineuse : l'**humeur vitrée** (indice : 1,339). Le fond de la chambre postérieure est tapissé par une membrane sensible, la **rétine**, formée par l'épaississement du **nerf optique**.

64. FORMATION DES IMAGES.

Expérience. — Nous observons qu'il se forme sur la rétine d'un œil de bœuf dont nous avons usé la partie postérieure de la sclérotique une image réelle et renversée d'un objet éloigné.

Conclusion. — Au point de vue optique, l'œil peut être assimilé à une chambre noire dont l'ouverture est munie d'une lentille convergente diaphragmée (œil réduit). La rétine, sur laquelle se forme l'image, se trouve au foyer de la lentille oculaire.

65. ACCOMMODATION. — L'œil normal ou emmétrope est conformé pour que l'image d'un objet situé à l'infini se forme sur la rétine lorsque l'œil est au repos (fig. 94). Lorsque l'objet se rapproche

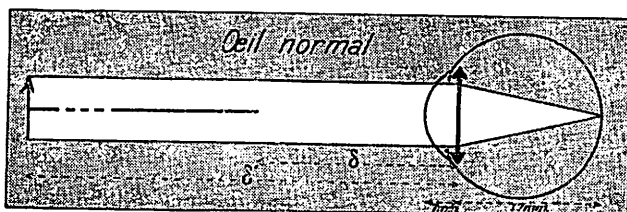


Fig. 94.

de l'œil, l'image de cet objet s'éloigne de la rétine (n° 56). Une mise au point est donc nécessaire pour ramener l'image sur la rétine; elle se produit grâce à la faculté que possède le cristallin d'augmenter la courbure de sa face antérieure et, par conséquent, sa convergence sous l'action des muscles ciliaires. Ce phénomène physiologique est connu sous le nom d'**accommodation**. L'incurvation du cristallin est naturellement limitée. Le point le plus rapproché que l'œil puisse voir nettement (accommodation maximum) se trouve à la **distance minimum de vision distincte** δ ; le point le plus éloigné que l'œil puisse voir nettement (accommodation nulle) se trouve à la **distance maximum de vision distincte** δ' . Pour l'œil normal ou emmétrope, ces distances sont respectivement 15 centimètres et l'infini.

Le trait situé dans l'axe optique de l'œil indique les positions extrêmes entre lesquelles il y a accommodation.

L'observation prolongée des objets situés à la distance minimum de vision distincte est très fatigante; aussi regardons-nous les objets de près en les plaçant à 25 cm ou 30 cm de l'œil c'est-à-dire à la distance normale de vision sans fatigue ou encore à la distance optimum.

66. DÉFAUTS DE L'ŒIL. — 1^o Œil myope. — L'œil myope est un œil trop convergent (fig. 95). Les images des objets éloignés se produisent en avant de la rétine. La distance maximum de vision

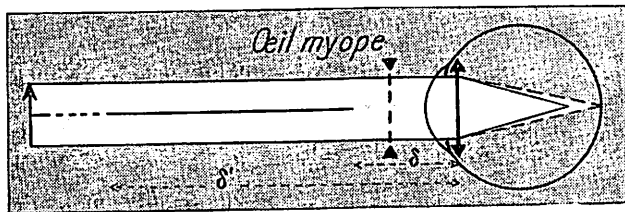


Fig. 95.

distincte δ' est de l'ordre du mètre; la distance minimum de vision distincte δ n'est que de 6 à 8 centimètres.

On corrige l'excès de convergence de l'œil myope en plaçant devant l'œil une lentille divergente (fig. 95); on augmente par ce correctif la distance maximum de vision distincte.

2^o Œil hypermétrope. — L'œil hypermétrope est un œil trop peu convergent (fig. 96). Les images des objets éloignés se produisent en

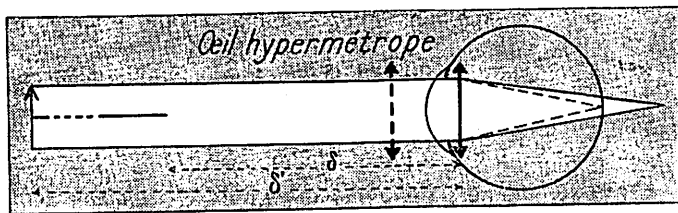


Fig. 96.

arrière de la rétine; l'œil doit accommoder pour voir un objet éloigné. La distance minimum de vision distincte δ peut atteindre plusieurs mètres.

On corrige l'hypermétropie en plaçant devant l'œil une lentille convergente (fig. 96); on diminue par ce correctif la distance minimum de vision distincte.

3^o Œil presbyte. — La faculté d'accommodation s'affaiblit et s'annule avec l'âge, la distance minimum de vision distincte δ augmente (fig. 97).

On corrige la presbytie, comme l'hypermétropie, par le port de verres convergents (fig. 97).

4^o) **Œil astigmat.** — L'œil astigmat est un œil dont la courbure de la cornée transparente ou du cristallin n'est pas régulière; il ne

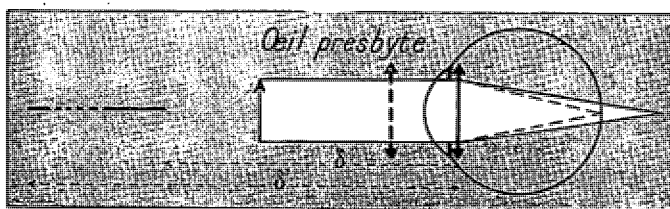


Fig. 97.

peut voir simultanément avec netteté deux droites perpendiculaires situées dans un même plan.

On corrige l'astigmatisme par le port de verres cylindriques c'est-à-dire par des verres limités soit par deux surfaces cylindriques, soit par une surface plane et une surface cylindrique.

67. DIAMÈTRE APPARENT D'UN OBJET. — Nous appellerons diamètre apparent de l'objet o l'angle a formé par les rayons lumineux allant des extrémités A et B de l'objet à l'œil (fig. 98). Considérons l'objet o perpendiculaire à l'axe optique de l'œil, nous avons :

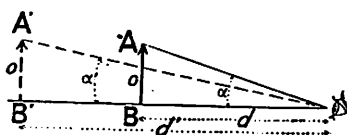


Fig. 98.

$$\operatorname{tg} a = \frac{o}{d}$$

Mais les angles sous lesquels l'œil voit nettement sont toujours petits, nous pouvons donc remplacer la tangente par l'angle évalué en radians. Nous avons :

$$a = \frac{o}{d}$$

Le diamètre apparent est directement proportionnel à la grandeur de l'objet et inversement proportionnel à la distance séparant l'objet de l'œil.

L'éloignement d'un objet se traduit donc par une diminution de son diamètre apparent. Si cet objet est de grandeur connue, la perception de son diamètre apparent nous permet d'évaluer la distance à laquelle il se trouve. C'est en cette appréciation des distances que consiste la notion de **perspective**.

68. POUVOIR SÉPARATEUR DE L'ŒIL.

Nous apercevons nettement un objet éloigné sans cependant pouvoir en distinguer les détails. Ainsi, sur une affiche vue de loin, nous lisons le texte imprimé en grands caractères mais nous ne déchiffrons pas le texte imprimé en petits caractères.

Deux points A et B ne sont perçus distinctement que si leurs images A' et B' se forment sur deux cellules nerveuses distinctes de la rétine : ils ne sont donc perçus distinctement que si l'angle sous lequel l'œil les voit est supérieur à une valeur minimum. L'angle minimum pour lequel la vision de deux points A et B est encore distincte définit le **pouvoir séparateur de l'œil** ou l'**acuité visuelle**. Pour un œil normal, cet angle minimum vaut environ 1 minute c'est-à-dire $1/3450$ radian. Puisque la distance de la rétine au centre optique (ce point se trouve près de la face postérieure du cristallin) est, pour l'œil normal, de 15 à 16 mm, la distance séparant les images A' et B' est

$$1,5 \cdot \frac{1}{3450} \simeq 0,0005 \text{ cm,}$$

distance séparant deux cellules nerveuses voisines de la rétine. Deux points distants d'un millimètre sont encore vus distinctement à une distance d telle que :

$$\frac{0,1}{d} = \frac{1}{3450} \text{ radian}$$

A une distance supérieure à 345 cm, l'œil ne perçoit plus qu'un point unique.

Pour augmenter la visibilité d'un objet, c'est-à-dire pour en apercevoir les détails, on approche l'objet le plus près possible de l'œil ou on utilise des instruments d'optique (loupe, longue-vue,...) de manière à augmenter le plus possible le diamètre apparent de l'objet.

69. PERSISTANCE DES IMPRESSIONS RÉTINIENNES.

Expérience. — Dessinons sur un disque blanc des arcs de cercle ainsi que l'indique la figure 99. Mettons ce disque en rotation rapide : les arcs de cercle nous apparaissent semblables à des circonférences complètes (fig. 99).

Conclusion. — L'impression rétinienne ne disparaît pas en même temps que la cause qui l'a produite. Lorsqu'un objet disposé devant l'œil disparaît, l'image de cet objet disparaît de la rétine mais néanmoins la sensation persiste. La durée de cette persistance est de l'ordre du dixième de seconde. Si l'objet réapparaît après une période de temps inférieure à un dixième de seconde, l'œil ne peut percevoir l'interruption et ne cesse donc de voir l'objet (cinéma). La persistance des impressions rétiniennes est la raison pour laquelle l'œil aperçoit des circonférences complètes lorsque le disque est animé d'une vitesse minimum de dix tours par seconde.

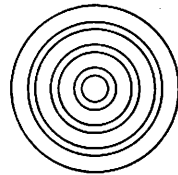
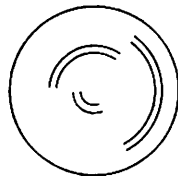


Fig. 99.

70. PERCEPTION DU RELIEF. — L'image produite par un objet sur la rétine de l'œil droit bien que ressemblant fortement à l'image produite par cet objet sur la rétine de l'œil gauche en diffère cependant quelque peu. Ces deux images, qui sont perçues simultanément par le cerveau, se superposent en produisant la sensation de relief.

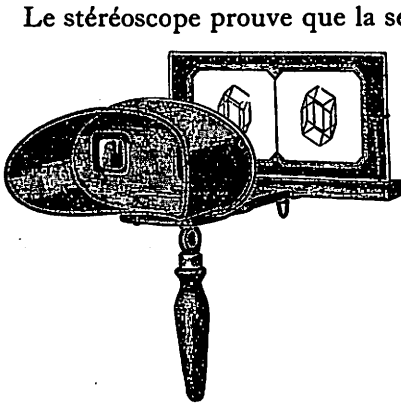


Fig. 100.

Le stéréoscope prouve que la sensation du relief est bien due à la perception simultanée et à la superposition de deux images légèrement différentes. Cet appareil se compose de deux lentilles convergentes identiques dont les axes principaux sont disposés à une distance égale à celle qui sépare les yeux et d'un support destiné à recevoir une carte portant deux photographies d'un même paysage (fig. 100). Ces deux photographies ont été obtenues à l'aide d'un appareil photographique muni de deux objectifs dont la distance est égale à l'écartement des yeux. Les lentilles du stéréoscope donnent de ces photographies deux images virtuelles, droites et agrandies. Par glissement du support, on amène ces deux images à se superposer. Cette image unique donne l'impression très nette du relief.

perception simultanée et à la superposition de deux images légèrement différentes. Cet appareil se compose de deux lentilles convergentes identiques dont les axes principaux sont disposés à une distance égale à celle qui sépare les yeux et d'un support destiné à recevoir une carte portant deux photographies d'un même paysage (fig. 100). Ces deux photographies ont été obtenues à l'aide d'un appareil photographique muni de deux objectifs dont la distance est égale à l'écartement des yeux. Les lentilles du stéréoscope donnent de ces photographies deux images virtuelles, droites et agrandies. Par glissement du support, on amène ces deux images à se superposer. Cette image unique donne l'impression très nette du relief.

71. ILLUSIONS D'OPTIQUE. — Les perceptions visuelles sont influencées par le milieu environnant. Des droites parallèles

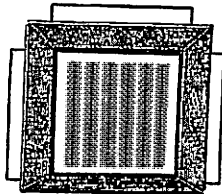


Fig. 101.



Fig. 102.

hachées nous semblent courbes (fig. 101). Bien que le trait de la figure 102 soit de largeur constante, la partie blanche nous apparaît plus large que la partie noire.

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Un myope ne voit distinctement qu'entre 25 cm et 7,5 cm. Quelle doit être la convergence de ses verres pour qu'il puisse voir à l'infini ? Quelle est avec les verres la distance minimum de vision distincte ?

SOLUTION. — a) Les lentilles divergentes que le myope doit porter doivent donner d'un objet situé à l'infini une image virtuelle située à 25 cm de l'œil ; la distance focale des lentilles est de :

$$f = - 25 \text{ cm.}$$

La convergence des verres du myope doit être de -4 dioptries.

b) La distance minimum de vision distincte naturelle du myope est de $7,5$ cm. La distance minimum de vision distincte δ du myope avec les verres est donnée par la relation.

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{\delta} - \frac{1}{7,5} = -\frac{1}{25}; \quad \frac{1}{\delta} = \frac{7}{75}; \quad \delta = 10,4 \text{ cm.}$$

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Un œil normal accommode jusqu'à une distance de 15 cm. Une lentille placée contre l'œil (loupe des horlogers) lui permet d'accommoder jusqu'à une distance de 5 cm. Déterminer : a) la convergence de la lentille; b) le diamètre apparent d'un objet de 1 mm placé au minimum de vision distincte vu à l'œil nu et vu avec la lentille; c) le rapport de grandeur des images formées sur la rétine dans les deux cas. R : a) $13,33$ dioptries; b) $1/150$ radian et $1/50$ radian; c) 3 .

2. Un œil hypermétrope accommode jusqu'à une distance de 120 cm. Quel est le rayon de courbure des verres plan-convexes qui lui permettent d'accommoder jusqu'à une distance de 20 cm (indice de réfraction des verres : $1,6$)? R : $14,4$ cm.

CHAPITRE V.

INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

72. CHAMBRE NOIRE AVEC OBJECTIF. — La chambre noire sans objectif (n° 7) peut donner des images très nettes mais peu lumineuses des objets extérieurs. Pour augmenter l'éclat de ces images sans nuire à leur netteté, on dispose, dans l'ouverture fortement agrandie de la chambre noire, une lentille convergente appelée objectif. La paroi postérieure de la chambre est constituée d'une plaque de verre dépoli servant d'écran; les parois latérales forment « soufflet ». La distance de l'image à l'objectif étant fonction de la convergence de l'objectif et de la distance de l'objet à l'objectif, on déplace l'écran jusqu'à ce qu'il s'y forme une image très nette de l'objet. Cette opération est connue sous le nom de **mise au point**.

73. APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE. — L'appareil photographique est une chambre noire dont l'écran est constitué d'un verre mat auquel nous pouvons substituer une plaque sensible à la lumière au moment de la photographie. Les parois latérales de la chambre noire forment un soufflet extensible qui permet la mise au point (1). L'objectif comporte un système complexe de lentilles en crown et en flint qui doit, dans les bons appareils, réaliser les conditions suivantes : a) réduire l'aberration de sphéricité de manière à avoir des images nettes (objectif aplanétique); b) réduire l'aberration de chromatisme sous peine d'avoir les bords des images flous (objectif achromatique); c) réduire l'aberration d'astigmatisme (objectif anastigmat); d) absorber le moins possible de lumière.

(1) Dans les appareils en forme de boîte qui ne comportent pas de mise au point, la plaque sensible se place toujours au foyer de l'objectif. Tous les objets situés à une distance de l'objectif supérieure à quarante fois la distance focale de l'objectif (c'est-à-dire à une distance de 4 à 5 mètres) forment pratiquement leur image sur la plaque sensible. Cet appareil ne peut être utilisé pour la photographie des objets plus rapprochés.

Le diaphragme, dont est muni l'appareil photographique, a pour but d'éviter l'aberration de sphéricité et, par conséquent, d'éviter la distorsion de l'image en ne laissant pénétrer que les rayons lumineux voisins de l'axe optique. En diaphragmant, on augmente la netteté de l'image mais on en diminue la luminosité. Il faut donc faire un compromis entre **luminosité** et **netteté**.

Un objectif est ordinairement défini par l'ouverture c'est-à-dire par le rapport du diamètre à la distance focale : ainsi, une lentille de 2 cm de diamètre et de 8 cm de distance focale a une ouverture de 0,25. L'ouverture d'un objectif en détermine la luminosité. Calculons les surfaces des images que donnent d'un carré de 1 m de côté distant de 1 m des lentilles de même diamètre (2 cm) mais de distances focales différentes (5 cm et 10 cm) :

Lentille d'ouverture 0,4						Lentille d'ouverture 0,2					
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\frac{1}{d'}$	$= \frac{1}{f}$	$-\frac{1}{d}$	$;$	$\frac{1}{d'}$	$= \frac{1}{5}$	$\frac{1}{d'}$	$= \frac{1}{f}$	$-\frac{1}{d}$	$;$	$\frac{1}{d'}$	$= \frac{1}{10}$
					100						100
					$d' = 5,3 \text{ cm.}$						$d' = 11,1 \text{ cm.}$
		$\frac{i}{o}$		$\frac{d'}{d}$				$\frac{i}{o}$		$\frac{d'}{d}$	
				5,3						11,1	
				$i = 100 \cdot \frac{5,3}{100} = 5,3 \text{ cm.}$						$i = 100 \cdot \frac{11,1}{100} = 11,1 \text{ cm.}$	

Surface de l'image : 28,1 cm².

Surface de l'image : 123,2 cm².

L'image de 28,1 cm² donnée par la lentille d'ouverture 0,4 reçoit autant de lumière que l'image de 123,2 cm² donnée par la lentille d'ouverture 0,2 : l'ouverture de l'objectif augmente la luminosité de l'image et, par conséquent, diminue le temps de pose.

74. PHOTOGRAPHIE. — La photographie est l'art d'obtenir et de fixer les images qui se forment dans la chambre noire à objectif.

Prise de vue. — Pour prendre une vue, nous mettons d'abord l'appareil au point en utilisant l'écran en verre mat; l'objectif étant obturé, nous substituons une plaque sensible à l'écran; nous démasquons ensuite l'objectif pendant un temps plus ou moins court (temps de pose) suivant la sensibilité de la plaque et l'éclairement de l'objet.

Épreuve négative. — La plaque impressionnée ne manifeste apparemment aucune modification. Elle est soumise, en chambre obscure, à l'action de réactifs dits **révélateurs** (acide pyrogallique, diamidophénol,...) : le sel d'argent impressionné par la lumière est

réduit à l'état d'argent métallique tandis que le sel d'argent non impressionné par la lumière reste inaltéré. Une image apparaît donc : les noirs de l'image correspondent aux blancs de l'objet et réciproquement. Lorsque le développement de l'image au degré désiré est obtenu, nous éliminons le sel d'argent qui n'a pas été impressionné en le dissolvant dans une solution d'hyposulfite de sodium. Après cette dernière opération connue sous le nom de **fixage**, la plaque, qui constitue une **épreuve négative ou cliché**, peut être manipulée à la lumière.

Épreuve positive. — Le cliché négatif est appliqué sur un papier recouvert d'une couche de sel d'argent puis exposé à la lumière. La lumière traverse les parties transparentes du cliché et est arrêtée par les parties opaques. Nous obtenons sur le papier au sel d'argent une **épreuve positive** c'est-à-dire une image ressemblant à l'objet. Nous procédons ensuite au virage (substitution de l'or à l'argent) et enfin au fixage de l'épreuve positive.

75. APPAREIL DE PROJECTION. — L'appareil de projection moderne sert à projeter sur un écran l'image agrandie d'un objet transparent (diascopie) ou d'un objet opaque (épiscopie). La figure 103 schématise l'appareil fonctionnant en épiscopie, la figure 104 schématise

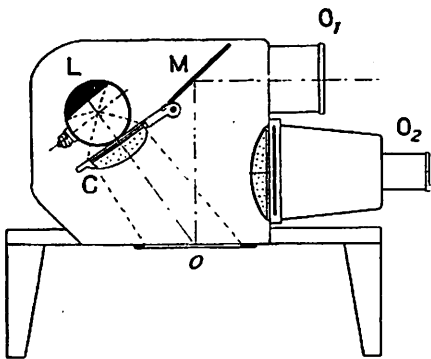


Fig. 103.

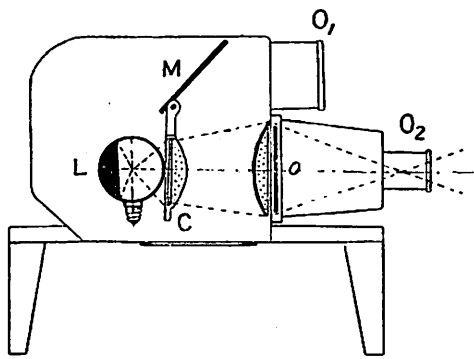


Fig. 104.

l'appareil fonctionnant en diascope. L'appareil comprend essentiellement : a) une source lumineuse puissante L constituée par une lampe à incandescence dont la lumière est concentrée sur l'objet à projeter o à l'aide de la surface métallisée de la lampe et à l'aide du condenseur C comprenant une ou deux lentilles; b) deux objectifs mobiles O₁ et O₂ constitués d'un système de lentilles convergentes : l'un O₁ est utilisé lorsque l'appareil fonctionne en épiscopie, l'autre O₂ lorsque l'appareil fonctionne en diascope; c) un miroir plan M utilisé quand l'appareil fonctionne en épiscopie. Un dispositif spécial permet de modifier la position de la lampe.

76. CINÉMATOGRAPHE. — Une longue bande sensible, appelée film, se déroule dans le fond d'un appareil photographique approprié devant lequel se passe une scène animée. Tous les quizièmes de seconde, cette bande s'immobilise un très court intervalle de temps durant lequel l'objectif se découvre. On photographie donc une série discontinue d'aspects de la scène animée ne différant que de très peu les uns des autres. Après développement du film négatif, on procède au tirage du film positif. Ce film se déroule, à l'aide d'un mécanisme analogue à celui de l'appareil de prise de vue, dans un appareil de projection dont l'objectif se découvre tous les quizièmes de seconde au moment précis où le film s'arrête.

On obtient sur l'écran une série d'images très peu différentes les unes des autres et séparées par un très court intervalle d'obscurité. Grâce à la persistance des impressions rétinienne, le spectateur a l'illusion d'une scène animée.

77. LOUPE. — La loupe, qui sert à observer les détails d'un objet, est uniquement constituée d'une lentille convergente (fig. 105). Elle donne d'un objet AB, situé entre le foyer et la lentille, une image A'B' virtuelle, droite et agrandie (fig. 106). La mise au point consiste uniquement à obtenir l'image au minimum de vision distincte ou tout au moins à la distance de vision sans fatigue (25 cm).



Fig. 105.

***Puissance.** — La puissance P d'une loupe est l'angle sous lequel elle nous fait apercevoir l'unité de longueur.

L'œil d'un observateur, placé au foyer de la lentille, voit un objet de longueur o sous un angle tel que :

$$a = \frac{A'B'}{FO + OB'}; \quad a = \frac{IO}{FO}; \quad a = \frac{o}{f}$$

La puissance de la loupe vaut donc, les angles étant petits :

$$P = \frac{a}{o}; \quad P = \frac{1}{f}$$

La puissance de la loupe s'exprime en dioptries et n'est autre que la convergence de la lentille (n° 60).

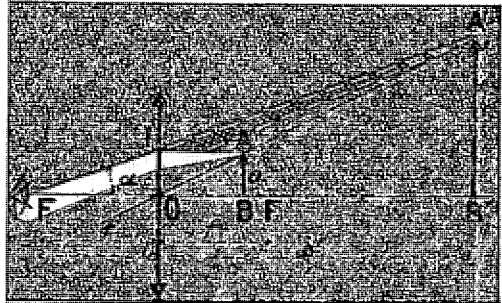


Fig. 106.

***Grossissement.** — Le grossissement angulaire est le rapport du diamètre apparent de l'objet vu à travers la loupe au diamètre apparent de l'objet vu à l'œil nu.

Un objet de longueur o vu à travers la loupe de puissance P y est aperçu sous un angle α tel que :

$$\alpha = Po.$$

Cet objet, placé au minimum de vision distincte, serait vu à l'œil nu sous un angle β tel que (n° 67) :

$$\beta = \frac{o}{\delta}.$$

Le grossissement, désigné par la lettre G , est par définition :

$$G = \frac{\alpha}{\beta}; \quad G = \frac{Po}{\frac{o}{\delta}}; \quad G = P\delta.$$

Le grossissement de la loupe est donc proportionnel à sa puissance.

78. MICROSCOPE (fig. 107). — Le microscope, qui sert à observer des objets très petits, comprend essentiellement deux lentilles convergentes : l'objectif L_1 et l'oculaire L_2 (fig. 108). L'objectif donne de l'objet AB , situé un peu au delà du foyer F'_1 , une image $A'B'$ réelle, renversée et très agrandie. L'oculaire donne de l'image $A'B'$ située un peu en deçà du foyer F_2 une image $A''B''$ virtuelle, droite et agrandie. L'objectif et l'oculaire sont fixés aux extrémités d'un tube creux, noirci intérieurement, qu'une crémaillère peut déplacer lentement dans le sens vertical. La latitude de mise au point est très faible : c'est pour cette raison que la crémaillère est pourvue d'une vis micrométrique qui permet de faibles déplacements. L'objet, observé par transparence, doit être très mince ; il est serré entre deux lames de verre et fortement éclairé à l'aide d'un miroir concave ou d'un système de lentilles.

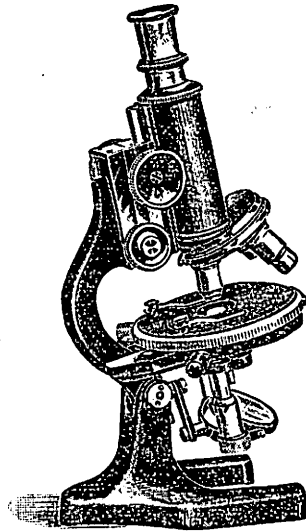


Fig. 107.

***Puissance.** — Désignons par o la grandeur de l'objet AB , par i_1 la grandeur de l'image $A'B'$, par i_2 la grandeur de l'image $A''B''$, par a

la distance séparant les foyers F_1 et F_2 , par f_1 la distance focale de l'objectif et par f_2 la distance focale de l'oculaire. Les triangles semblables IF_1O_1 et $A'F_1B'$ donnent successivement :

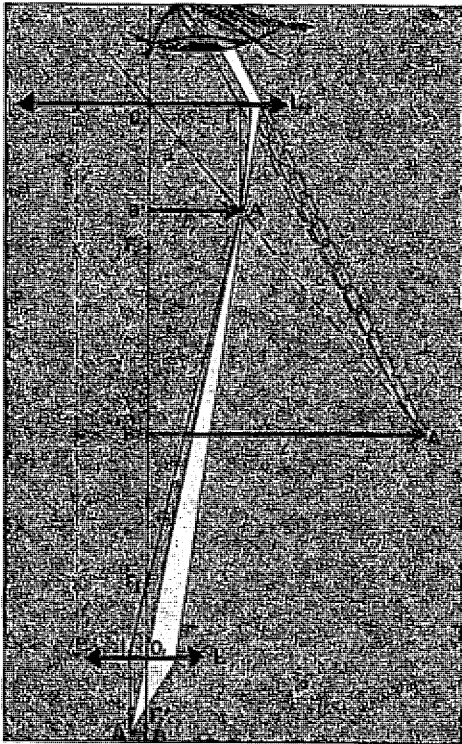


Fig. 108

$$\frac{o}{i_1} = \frac{f_1}{a}$$

et

$$i_1 = o \cdot \frac{a}{f_1} \quad (1)$$

L'œil étant placé très près de l'oculaire, l'image $A'B'$ est vue à travers l'oculaire sous un diamètre apparent a tel que :

$$a = \frac{i_1}{f_2} \quad (2)$$

Combinons les relations (1) et (2), nous obtenons :

$$a = o \cdot \frac{a}{f_1 f_2}$$

La puissance P du microscope est l'angle sous lequel il nous fait apercevoir l'unité de longueur.

Elle vaut donc :

$$P = \frac{a}{o}; \quad P = \frac{a}{f_1 f_2}$$

***Grossissement.** — L'angle a sous lequel l'objet est vu à travers le microscope est :

$$a = o \cdot \frac{a}{f_1 f_2}$$

Cet objet serait vu à l'œil nu sous un angle β tel que :

$$\beta = \frac{o}{\delta}$$

Le grossissement G vaut donc :

$$G = \frac{a}{\beta}; \quad G = \frac{a\delta}{f_1 f_2}; \quad G = P\delta$$

Les microscopes modernes ont une puissance qui atteint 12000 dioptries. Leur grossissement, pour un œil normal ($\delta = 20$ cm), est de 2400.

79. ULTRAMICROSCOPE. — Des particules de l'ordre de grandeur de 0,00001 cm ne sont plus visibles avec les microscopes même les plus puissants. On peut néanmoins constater l'existence de particules de cet ordre de grandeur sans cependant pouvoir en distinguer les détails. La préparation renfermant les particules ultramicroscopiques est fortement éclairée latéralement; les particules sont visibles au microscope parce qu'elles diffusent fortement la lumière incidente, elles apparaissent sous forme de taches brillantes sur fond noir.

80. LUNETTE ASTRONOMIQUE (fig. 109). — La lunette astronomique est destinée à l'observation des astres. L'objectif, constitué par une lentille convergente, donne de l'objet situé à l'infini une image réelle située dans le plan focal. Cette image est observée au moyen de l'oculaire qui fonctionne comme loupe (fig. 110). A cause de son pouvoir grossissant, la lunette n'embrasse qu'une faible portion de l'espace; aussi lui adjoint-on un chercheur, petite lunette auxiliaire d'un faible grossissement et par conséquent d'un champ plus étendu. Lors d'une observation, on commence par placer, à l'aide du chercheur, l'astre à étudier dans l'axe de la lunette. Les deux lunettes étant parallèles, l'astre est visible dans la lunette astronomique lorsqu'il l'est dans le chercheur.

***Grossissement.** — Désignons par f_1 la distance focale de l'objectif L_1 et par f_2 la distance focale de l'oculaire L_2 . L'angle β sous lequel l'objet est vu à l'œil nu est tel que :

$$\beta = \frac{A'B'}{f_1}.$$

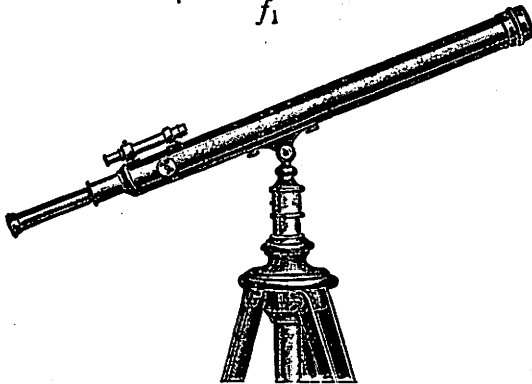


Fig. 109.

L'angle α sous lequel l'objet est vu dans la lunette est tel que :

$$\alpha = \frac{A''B''}{O''B''} = \frac{A'B'}{f_2}.$$

Le grossissement G vaut donc :

$$G = \frac{\alpha}{\beta}; \quad G = \frac{f_1}{f_2}$$

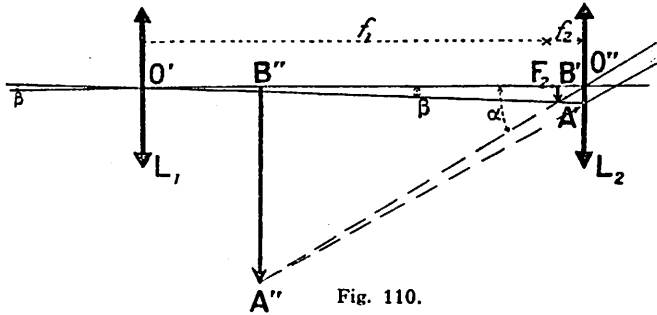


Fig. 110.

Le grossissement de la lunette est donc égal au quotient de la distance focale de l'objectif par la distance focale de l'oculaire. Les lunettes astronomiques employées dans les observatoires grossissent mille fois.

81. LUNETTE TERRESTRE OU LONGUE-VUE. — La lunette astronomique donne d'un objet une image renversée. La lunette terrestre est une lunette astronomique pourvue d'un système redresseur de l'image (fig. 111). Ce système redresseur est constitué

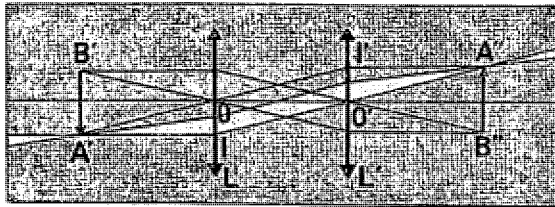


Fig. 111.

de deux lentilles convergentes L et L' identiques, placées au foyer l'une de l'autre. L'image $A'B'$, réelle et renversée, donnée par l'objectif se trouve dans le plan focal de la lentille L du système redresseur. Le rayon $A'I$ parallèle à l'axe optique rencontre, après réfraction dans la lentille L , la lentille L' au centre optique O' ; il n'y subit donc aucune déviation nouvelle. Le rayon $A'I'$, passant par le centre optique O de la lentille L , émerge, après réfraction dans la lentille L' , parallèlement à l'axe optique. Le point A'' , image du point A' , se trouve dans le plan focal de la lentille L' . Il en est exactement de même pour le point B'' , image du point B' . L'image $A''B''$, qui est réelle et redressée, est examinée au moyen de l'oculaire qui fonctionne comme loupe.

82. LUNETTE DE GALILÉE. — La longue-vue est un instrument encombrant. Lorsqu'il s'agit de faibles grossissements, il est plus commode de se servir de la lunette de Galilée.

L'objectif, constitué d'une lentille convergente, donnerait de l'objet une image $A'B'$ réelle et renversée (fig. 112). L'oculaire, constitué d'une lentille divergente, ne laisse pas se former cette image; elle réfracte les rayons lumineux qui émergent en divergeant. L'œil, qui reçoit les rayons émergents, perçoit de l'objet une image $A''B''$ virtuelle, droite et très rapprochée.

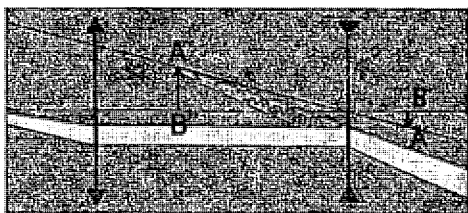


Fig. 112.

Les jumelles de spectacle comprennent deux lunettes de Galilée montées parallèlement ou deux lunettes à prismes à réflexion totale.

83. TÉLESCOPE. — Pour obtenir des images nettes et très agrandies des astres, on a dû abandonner les lentilles dont le moindre défaut d'homogénéité dans le verre altère la netteté des images. Le

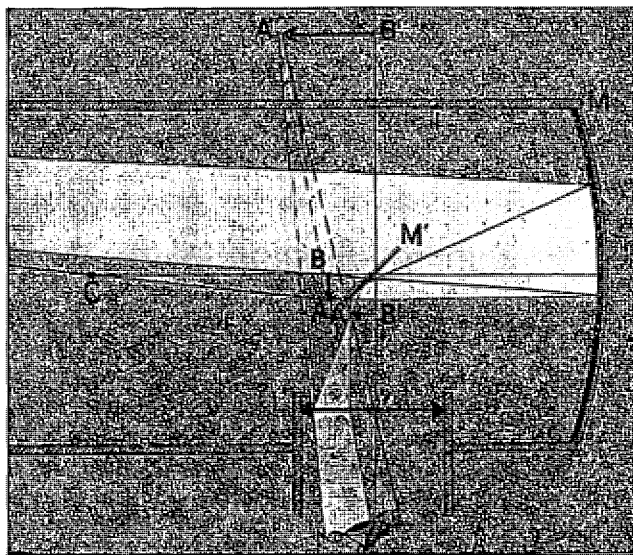


Fig. 113.

télescope est constitué d'un miroir concave M (ou mieux parabolique) disposé au fond d'un long tube, d'un miroir plan M' ou d'un prisme à réflexion totale et d'un oculaire L (fig. 113). Le miroir concave

donnerait de l'astre une image réelle AB. Le miroir plan incliné M', qui donne une image réelle A'B', renvoie dans le tube latéral les rayons lumineux réfléchis sur le miroir concave M. L'oculaire L, qui fonctionne comme loupe, donne de l'image A'B' une image A''B'' fortement agrandie. Le télescope du Mont Wilson a un diamètre de 2,50 m et une longueur de 16 m.

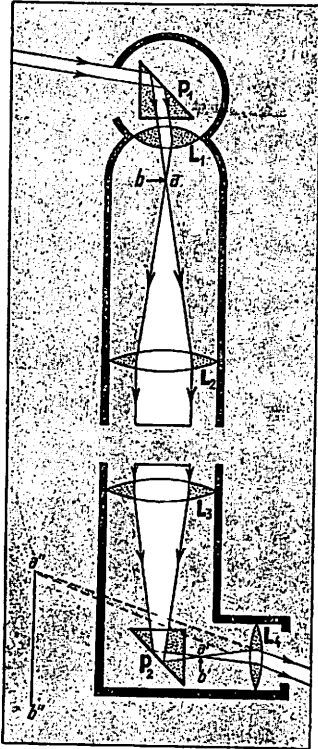


Fig. 114.

84. PÉRISCOPE. — Le périscope, qui est un appareil permettant de voir les objets situés à un niveau supérieur à celui de l'observateur est très utilisé par les sous-marins en plongée pour explorer la surface de la mer (fig. 114).

Les rayons issus de l'objet à observer forment, après avoir traversé le prisme à réflexion totale P₁ et la lentille convergente L₁, une image réelle *ab* située au foyer de la lentille L₂. Les rayons parallèles sortant de la lentille L₂ sont repris par la lentille L₃ qui les fait converger sur le prisme à réflexion totale P₂. Les rayons sortant du prisme P₂ forment l'image réelle *a'b'* qui est examinée au moyen de la lentille L₄ fonctionnant comme loupe.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. On veut photographier un automobile qui se déplace à la vitesse de 72 km/h perpendiculairement à l'axe principal de l'appareil. La distance focale de l'objectif est de 10 cm; la distance du mobile à l'appareil est de 100 m. Quel doit être le temps de pose maximum sachant que l'image est considérée comme nette si, pendant la photographie, un point de cette image ne s'est pas déplacé de plus de 0,1 mm ?

SOLUTION. — Calculons la position à donner à la plaque sensible :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{10\,000} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{10}; \quad \frac{1}{d'} = \frac{1}{10} - \frac{1}{10\,000}; \quad d' = 10,01 \text{ cm} \approx 10 \text{ cm}$$

L'image peut se déplacer de 0,01 cm sans cesser d'être nette. Calculons le déplacement de *x* cm de l'automobile pour un déplacement de 0,01 cm de l'image.

$$\frac{x}{0,01} = \frac{10\,000}{10}; \quad x = 10 \text{ cm.}$$

L'automobile se déplace donc de 10 cm quand l'image se déplace de 0,01 cm.

Le temps que met l'automobile pour parcourir 10 cm est :

$$t = \frac{e}{v}; \quad t = \frac{10}{7\,200\,000} = \frac{1}{720\,000} \text{ s.}$$

3 600

Le temps de pose ne peut pas dépasser le 1/200 de seconde.

2. Un microscope est constitué d'un oculaire et d'un objectif dont les distances focales sont respectivement de 20 mm et 5 mm. On demande de calculer : a) la puissance du microscope; b) le grossissement; c) la distance séparant l'objet de l'objectif sachant que la distance séparant les foyers de l'oculaire et de l'objectif est de 20 cm. L'image est située au minimum de vision distincte (20 cm).

SOLUTION. — a) Puissance du microscope :

$$P = \frac{a}{f_1 f_2}; \quad P = \frac{0,20}{0,005 \cdot 0,02} = 2\,000 \text{ dioptries.}$$

b) Grossissement du microscope : $G = P \delta$; $G = 2\,000 \cdot 0,2 = 400$.

c) Calculons la position de l'image A'B' donnée par l'objectif (fig. 108) :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{d} - \frac{1}{20} = \frac{1}{2}; \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{2} + \frac{1}{20}; \quad d = \frac{20}{11} \text{ cm.}$$

L'image A'B' donnée par l'objectif est donc située à 20/11 cm de l'oculaire et à 227/11 cm de l'objectif. Calculons la position de l'objet :

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}; \quad \frac{1}{d} + \frac{11}{227} = \frac{1}{0,5}; \quad \frac{1}{d} = \frac{1}{0,5} - \frac{11}{227}; \quad d = 0,51 \text{ cm.}$$

L'objet est donc situé à 5,1 mm de l'objectif.

EXERCICES NUMÉRIQUES

1. Une chambre noire a 15 cm de profondeur et 18 cm de largeur. On veut obtenir sur la paroi de fond l'image tout entière d'un tableau large de 6 m. A quelle distance minimum de la chambre noire faut-il placer le tableau? R : 5 m.

2. On photographie une inscription dont les lettres ont 15 cm de hauteur. L'appareil dont l'objectif a une puissance de 5 dioptries se trouve à 4 m de l'inscription. Calculer : a) la hauteur des lettres obtenues sur la plaque photographique; b) la hauteur de l'image des lettres obtenue en regardant ces lettres avec une loupe de 6 cm de distance focale sachant que l'image se forme à 25 cm de la loupe R : a) 0,79 cm; b) 4 cm.

3. Une loupe a une distance focale de 5 cm. L'observateur qui s'en sert place la loupe de façon que l'image se forme à 15 cm de la loupe. L'œil de l'observateur est placé soit au foyer de la loupe, soit contre la loupe. Calculer dans les deux cas : a) le grossissement de la loupe; b) la position de l'objet; c) le grandissement; d) la distance minimum de deux points de l'objet séparés par l'œil dont le pouvoir séparateur est 1/3000 radian R : a) 3 et 4; b) 3,33 cm et 3,75 cm; c) — 3 et — 4; d) 1/60 mm et 1/80 mm.

4. Dans un microscope, l'objectif et l'oculaire, assimilables à des lentilles minces, ont respectivement 4 mm et 24 mm de distance focale et sont distants de 164 mm. Un objet forme son image au minimum de vision distincte (20 cm) de l'œil placé contre l'oculaire. Déterminer : a) la puissance du microscope; b) le grossissement; c) la position de l'objet par rapport à l'objectif; d) le grandissement; e) la distance minimum séparant deux points de l'objet vus distinctement dans le microscope (pouvoir séparateur de l'œil : 1/3000 radian); f) le déplacement du tube microscopique pour faire passer l'image de l'infini au minimum de vision distincte. R : a) 1416 dioptries; b) 283,2; c) 4,115 mm; d) 325; e) $0,2 \cdot 10^{-3}$ mm; f) $2,5 \cdot 10^{-3}$ mm.

5. L'objectif d'une lunette astronomique a une distance focale de 1 m; l'oculaire a une distance focale de 2 cm. Calculer : a) le grossissement de la lunette; b) le diamètre de l'image de la Lune formée à 20 cm de l'œil de l'observateur (diamètre apparent de la Lune : 30'). R : a) 50; b) 9,57 cm.

6. Une lunette de Galilée a pour objectif une lentille de 2,5 dioptries et pour oculaire une lentille de — 10 dioptries. L'œil, placé contre l'oculaire, voit d'un objet situé à 50 m une image formée à 2 m. Calculer a) la distance objectif-oculaire; b) le grandissement; c) le grossissement. R : a) 20 cm; b) 8/100; c) 2.

7. Un objet se déplace de $-\infty$ à $+\infty$ devant une lentille convergente de 2 dioptries. Faire le graphique : positions de l'image et grandeur de l'image en fonction des positions de l'objet.

Même question pour une lentille divergente de — 2 dioptries.

LECTURE

L'APPAREIL PHOTOGRAPHIQUE

« Ceux qui s'entêtent de pratiquer sans science sont comme des marins montant sur un navire sans timon ni boussole et qui ne savent jamais avec certitude où ils vont. »

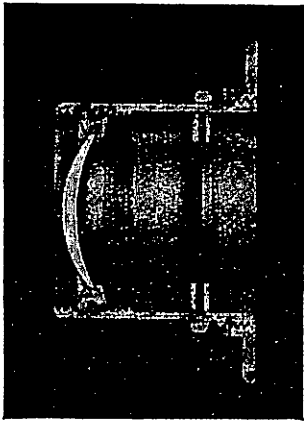
LÉONARD DE VINCI.

En évitant la complexité de la technique photographique (1), essayons de comprendre les opérations effectuées lorsque nous manipulons un appareil à film.

1. OBJECTIF. — La qualité de l'objectif fait la qualité de l'appareil photographique.

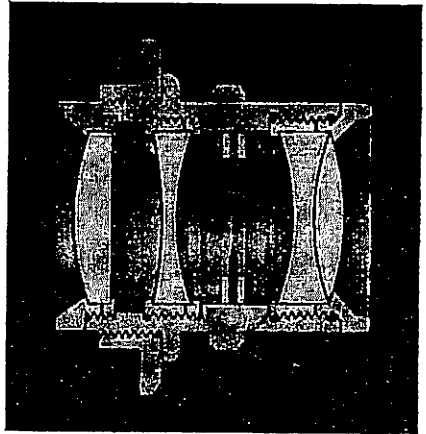
a) **Constitution.** — Dans le « box », l'objectif est un ménisque convergent (fig. 115). On diminue les défauts de cette unique lentille en diaphragmant fortement (le diamètre du diaphragme est égal au onzième de la distance focale) de manière à supprimer les rayons marginaux.

Dans les appareils plus perfectionnés, l'objectif est un système convergent comportant deux groupes de lentilles (fig. 116) de manière à corriger les aberrations. La correction la plus difficile est la correction d'astigmatisme des rayons très inclinés sur l'axe optique : aussi le commerce qualifie d'anastigmat un objectif de bonne qualité.



Cliché Larousse
La Science et ses applications

Fig. 115.



Cliché Larousse
La Science et ses applications

Fig. 116.

Dans un but de simplification, nous assimilerons l'objectif à une lentille mince sans défaut.

(1) Un guide très fouillé de la technique photographique : Manuel de photographie Gevaert par A. H. S. Craeybeckx.

b) **Focale.** — La distance focale ou plus simplement la focale de l'objectif commande trois caractéristiques importantes : le grandissement, l'angle de champ et la luminosité.

D'un objet situé à l'infini, l'objectif donne une image située dans le plan focal : la grandeur de cette image est directement proportionnelle à la focale f . Grande dans les appareils de portraitistes (elle est supérieure à 20 cm), la focale est réduite dans les appareils d'amateurs (elle est comprise entre 3,5 cm et 10 cm). Souvent, la focale est égale ou très légèrement supérieure à la diagonale du cliché : pour un cliché 6 . 9; diagonale : 10,5 cm; focale : 10,5 à 11 cm. En pratique, le format de la pellicule limite la grandeur de l'image.

L'angle de champ α est l'angle au sommet du cône lumineux ayant pour base l'image et pour sommet le centre de l'objectif (fig. 117). Cet angle limite la région de l'espace contenant les objets formant image sur la pellicule. Pour un format déterminé, cet angle est d'autant plus grand que la focale est petite :

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{AB}{2f}$$

Tandis que le champ couvert par l'objectif d'une lunette astronomique ne dépasse pas 6°, l'objectif d'un appareil photographique embrasse un champ de quelque 50°. Ainsi,

avec un cliché 2,4 . 3,6	{	pour $f = 3,5$ cm; $\alpha = 63^\circ$
		pour $f = 5$ cm; $\alpha = 47^\circ$
avec un cliché 6 . 9	{	pour $f = 7,5$ cm; $\alpha = 73^\circ$
		pour $f = 10$ cm; $\alpha = 58^\circ$

L'objectif dit grand angulaire embrasse un champ de 90° environ.

La luminosité de l'objectif, c'est-à-dire la quantité de lumière reçue par unité de surface de l'image, est, toutes autres choses égales (même sujet, même ouverture du diaphragme), en raison inverse de la surface de l'image. Or, si la focale est doublée, la grandeur de l'image est doublée et la surface de l'image est quadruplée. La luminosité de l'objectif est donc en raison inverse du carré de la distance focale.

En résumé, la grandeur de l'image est proportionnelle à la focale; l'angle de champ est inversement proportionnel à la focale; la luminosité est inversement proportionnelle au carré de la focale.

c) **Diaphragme.** — Pour effectuer une prise de vue avec un appareil photographique, appareil que caractérisent focale et format, il faut choisir l'ouverture du diaphragme, dispositif à iris dont un mécanisme fait varier l'ouverture (fig. 118). L'ouverture du diaphragme limite le faisceau de lumière qui, issu d'un point, pénètre dans l'appareil. Doubler le diamètre de l'ouverture, c'est quadrupler

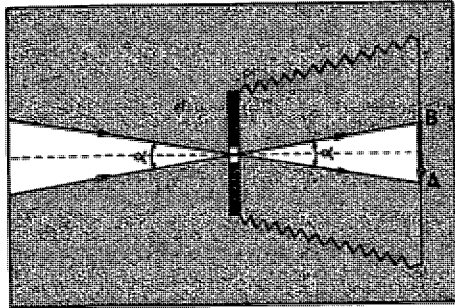


Fig. 117.



Fig. 118.

le flux lumineux qui pénètre dans l'appareil et réduire au quart le temps de pose (fig. 119). Les diamètres des ouvertures du diaphragme sont toujours choisis de façon que les temps de pose soient en progression géométrique de raison 2.

Temps de pose	1	2	4	8	16	32	64
Ouverture	64	32	16	8	4	2	1
Diamètre de l'ouverture...	8	5,6	4	2,8	2	1,4	1

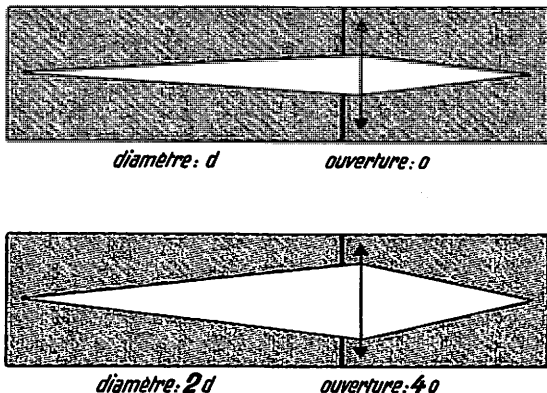


Fig. 119.

Désignons par d le diamètre du diaphragme **supposé placé devant l'objectif** (si le diaphragme est situé dans l'objectif même, on prend le diamètre du diaphragme qui, placé devant l'objectif, limiterait le faisceau lumineux d'une façon identique). La luminosité de l'objectif qui est inversement proportionnelle au carré de la focale f est proportionnelle au carré du diamètre de l'ouverture du diaphragme

$$l = \frac{d^2}{f^2}$$

Cependant, l'usage veut que l'on caractérise la luminosité de l'objectif par le rapport d/f que l'on exprime toujours sous la forme $1/n$

$$\frac{1}{n} = \frac{d}{f} \quad ; \quad n = \frac{f}{d}$$

Ainsi, si $d = f/8$, l'ouverture relative du diaphragme est

$$\frac{d}{f} = \frac{1}{8}$$

et l'objectif est diaphragmé à $1/8$ ou à $f/8$. Augmenter n est donc diminuer l'ouverture de diaphragme et augmenter le temps de pose.

Pour choisir la valeur $1/n$ du diaphragme, on fait glisser un index sur une échelle graduée que porte la monture de l'objectif. La valeur maximum de $1/n$ correspondant à l'ouverture maximum du diaphragme est une caractéristique de l'appareil. Un objectif de $1/3,5$ ou $f/3,5$ signifie que l'ouverture maximum du diaphragme a un diamètre $f/3,5$. Les autres ouvertures de ce diaphragme ont des diamètres

$$\frac{f}{3,5 \cdot 1,4} \quad ; \quad \frac{f}{3,5 \cdot 2} \quad ; \quad \frac{f}{3,5 \cdot 2,8} \quad \dots$$

Les meilleurs objectifs vont jusqu'à $f/1,5$; l'objectif du « box » est généralement $f/11$.

L'ouverture du diaphragme commande encore la **profondeur de champ** : lorsque nous photographions simultanément divers objets situés à des distances différentes, l'image reste suffisamment nette pour tous les objets situés entre deux plans limites dont l'écart exprime la profondeur du champ. Par exemple, avec un appareil de 10 cm de focale et une mise au point à 10 m, les objets situés entre 6,7 m et 19,6 m forment une image nette pour $n = 4$, entre 4,3 m et l'infini forment une image nette pour $n = 11$. La profondeur de champ augmente lorsqu'on ferme le diaphragme (n grand). Elle est indiquée dans des tables accompagnant l'appareil ou sur un anneau monté sur l'appareil lui-même.

En résumé, l'ouverture du diaphragme commande :

1°) le **temps de pose** : le temps de pose augmente lorsque l'ouverture diminue (n grand);

2°) la **profondeur de champ** : la profondeur de champ augmente lorsque l'ouverture diminue (n grand);

3°) la **netteté de l'image** : en réduisant l'ouverture, on supprime les rayons marginaux et on augmente la netteté de l'image.

2. TIRAGE ET TÉLÉMÈTRE. — On sait que la distance de l'image à l'objectif augmente lorsque l'objet à photographier se rapproche de l'appareil photographique : il y a donc nécessité de déplacer la pellicule sensible par rapport à l'objectif c'est-à-dire de varier le tirage.

Dans les appareils à grande focale, le tirage s'effectue au moyen d'un soufflet; dans les appareils à faible focale, le tirage s'opère en faisant coulisser l'objectif sur le manchon support.

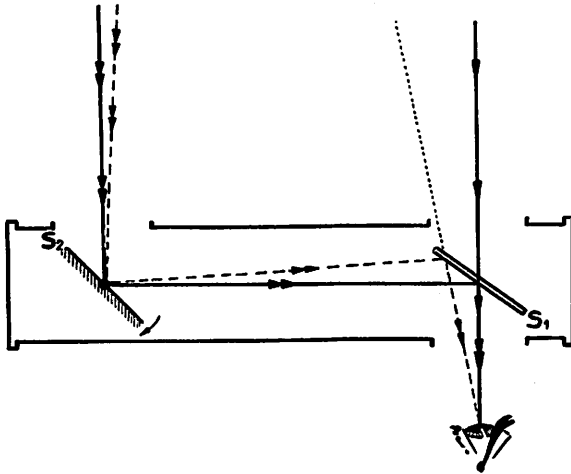


Fig. 120.

Le « box » ne permet aucune mise au point : aussi n'est-il utilisé qu'à la photographie d'objets éloignés. La plaque sensible se trouvant dans le plan focal de l'objectif, tous les objets situés à une distance de l'objectif supérieure à quarante fois la distance focale de l'objectif (c'est-à-dire à une distance de 4 à 5 m de l'objectif) forment pratiquement leur image sur la plaque sensible.

Dans les appareils modernes, la mise au point s'opère à l'aide d'un viseur télémétrique (fig. 120). Le viseur télémétrique comporte deux miroirs obliques distants de quelques centimètres : le miroir S_1 semi-transparent est fixe tandis que le miroir S_2 ordinaire est mobile. L'œil de l'opérateur voit l'objet à travers le miroir S_1 et l'image de l'objet par réflexions successives sur le miroir S_2 et le miroir S_1 . Si l'objet se rapproche de l'appareil photographique, l'image donnée par le miroir S_2 s'écarte de l'objet directement observé à travers le miroir S_1 . Pour superposer objet et image, l'opérateur fait tourner le miroir S_2 sur son axe. Le mouvement du miroir S_2 est transmis à un levier qui déplace l'index d'une échelle des distances (télé-mètre classique) ou est directement transmis à la monture de l'objectif de sorte que le tirage s'effectue automatiquement (télé-mètre couplé à l'objectif).

3. TEMPS DE POSE ET POSEMÈTRE. — Pendant la mise au point, la pellicule sensible est protégée de la lumière par un obturateur opaque constitué ordinairement de lamelles en forme de faucilles susceptibles de glisser les unes sur les autres sous la pression d'un ressort. Pour effectuer la prise de vue, l'opérateur démasque l'obturateur pendant le temps de pose qu'il a choisi c'est-à-dire pendant un temps compris entre 1 s et 0,002 s.

Le temps de pose doit être tel que la pellicule sensible reçoive la quantité de lumière nécessaire à une impression convenable. Pour un appareil déterminé, il dépend

1^o de l'ouverture du diaphragme. Souvenons-nous que les ouvertures du diaphragme sont calculées de manière telle que nous devons doubler le temps de pose lorsque nous déplaçons l'index d'un nombre n au nombre immédiatement supérieur;

2^o de la sensibilité de la pellicule. De même qu'une température est exprimée par des nombres différents selon l'échelle adoptée, de même une sensibilité est exprimée par des nombres différents selon l'échelle adoptée : ainsi, 27° Scheiner des films Gevaert correspond à 17/10 DIN des films Agfa (Kodak ne donne aucune indication chiffrée) ; une augmentation de 3° Scheiner ou 3/10 DIN correspond à une sensibilité doublée et, par conséquent, à un temps de pose diminué de moitié;

3^o de la quantité et du genre de lumière qu'envoie l'objet à travers l'objectif. Ces deux derniers facteurs sont fortement influencés en lumière naturelle par la saison, l'heure, l'état du ciel ; en lumière artificielle par la couleur de la lumière (lampe au sodium, éclair au magnésium) éclairant l'objet.

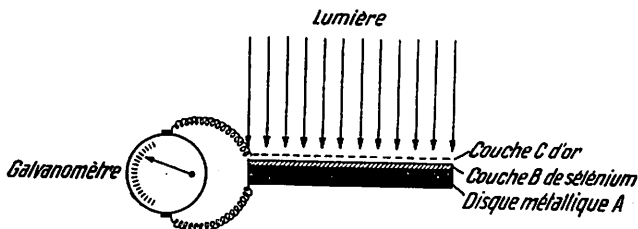


Fig. 121.

Le posemètre ou cellule photoélectrique permet de mesurer la lumière réfléchie par l'objet à photographier (fig. 121). Il consiste essentiellement en un disque métallique A recouvert d'une couche B de sélénium de 0,1 mm d'épaisseur sur laquelle on a déposé (par pulvérisation cathodique) une couche C d'or ou de platine tellement mince (épaisseur de 0,000 001 mm)

qu'elle est transparente à la lumière. Sous l'action de la lumière, le sélénium libère des électrons qui, captés par l'or, lui communiquent un potentiel négatif : la couche d'or *C* joue le rôle de cathode et le disque métallique *A* joue le rôle d'anode. Un galvanomètre très sensible *G* mesure la très faible intensité du courant électrique qui résulte de l'effet photoélectrique (n° 206). Dans des conditions convenables, l'intensité du courant est proportionnelle à l'intensité de la lumière. Le galvanomètre comporte généralement deux échelles de sensibilité correspondant, l'une, à une lumière faible, et, l'autre, à une lumière forte.

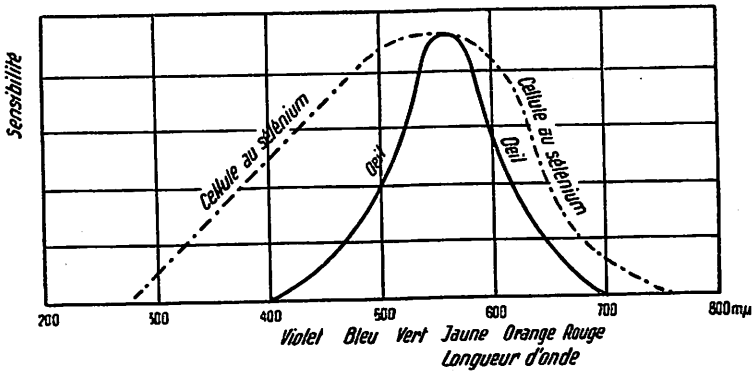


Fig. 122.

Enorme avantage : la courbe de sensibilité spectrale de la cellule au sélénium est analogue à la courbe de sensibilité spectrale de l'œil humain (le maximum de sensibilité se trouve dans le jaune) (fig. 122).

Le nombre indiqué par le galvanomètre du posemètre combiné avec l'ouverture du diaphragme et la sensibilité du film permet de fixer correctement le temps de pose.

Objectif, télémètre et posemètre ne sont plus des objets mystérieux : nous pouvons les manœuvrer en comprenant le mécanisme.

LIVRE VI

ÉLECTRICITÉ

CHAPITRE I

ÉLECTROSTATIQUE

§ 1. ÉLECTRISATION PAR FROTTEMENT

1. PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX

85. ÉLECTRISATION PAR FROTTEMENT. — Les Anciens savaient que l'ambre (en grec : électron) frotté a la propriété d'attirer les corps légers. Plusieurs corps : verre, ébonite, soufre,... frottés avec une étoffe de laine ou avec une peau de chat acquièrent cette même propriété. Ces corps sont dits **électrisés** et la cause qui leur a conféré la propriété d'attirer les corps légers est appelée **électricité**.

Pour détecter l'état électrisé, on se sert du pendule électrique, appareil consistant en une petite balle en moelle de sureau suspendue par un fil de soie à un support (fig. 123). Lorsqu'on approche du pendule un corps électrisé, la balle de sureau est attirée.

La plupart des solides, tous les métaux entre autres, ne semblent pas s'électriser par frottement lorsqu'ils sont tenus directement à la main. Mais s'ils sont tenus par un manche en verre ou s'ils sont posés sur une couche de paraffine, ils attirent vivement la balle de sureau d'un pendule électrique lorsqu'ils ont été frottés par une peau de chat.

Ces faits prouvent que tous les corps s'électrisent par frottement.

86. CONDUCTEURS ET ISOLANTS.

Expérience. — Electrisons par frottement un bâton d'ébonite et une tige de cuivre tenue par un manche de verre; touchons-les du doigt en un point quelconque : nous observons que l'ébonite conserve son électricité tandis que le cuivre perd son électricité.

Conclusion. — L'ébonite est un corps mauvais conducteur de l'électricité : l'électricité reste localisée à l'endroit où elle a été développée sans pouvoir se déplacer; le cuivre est un corps bon conducteur de l'électricité : l'électricité se répand aisément sur tout le corps en sorte que, mis en communication avec le sol (mis à la terre) par l'intermédiaire du corps humain, toute l'électricité s'en échappe.

Les corps bons conducteurs de la chaleur sont bons conducteurs de l'électricité; les isolants thermiques sont également des isolants électriques. Citons comme bons conducteurs : les métaux, le charbon,

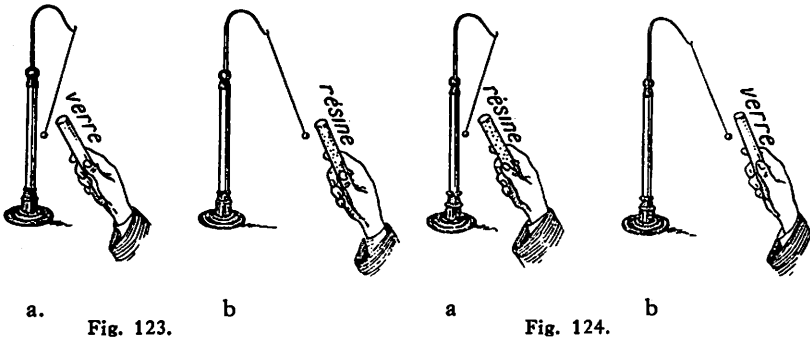
le sol, les solutions aqueuses d'acides, de bases et de sels,...; comme isolants : le verre, la paraffine, le soufre, l'ébonite, la porcelaine, la soie, le caoutchouc, le pétrole, l'air, les gaz secs,... Entre ces deux catégories extrêmes existe toute la gamme de corps plus ou moins bons conducteurs

87. ÉLECTRISATION PAR CONTACT. — Il résulte de ce qui précède qu'un conducteur isolé non chargé s'électrise au contact d'un conducteur électrisé, l'électricité du conducteur électrisé se partageant entre ces deux conducteurs. Un isolant électrisé mis en contact avec un conducteur ne perd que l'électricité de la surface mise en contact avec le conducteur. On décharge un isolant électrisé en le passant dans une flamme.

88. DISTINCTION DE DEUX ESPÈCES D'ÉLECTRICITÉ.

Expériences. — 1. Approchons du pendule électrique un bâton de verre électrisé par frottement avec une étoffe de drap, la balle de sureau est attirée par le verre, s'électrise par contact et est vivement repoussée par le verre (fig. 123 a).

Approchons de la balle de sureau électrisée au contact du verre un bâton de



résine électrisé par frottement avec une peau de chat, la balle de sureau est vivement attirée par la résine (fig. 123 b).

2. Constatons, en expérimentant de la même façon, que la balle de sureau électrisée par contact avec la résine est repoussée par la résine et attirée par le verre (fig. 124 a et b).

Conclusions. — 1. L'électricité du verre est donc différente de l'électricité de la résine. Nous sommes amenés à admettre l'existence de **deux électricités** : par convention, l'électricité acquise par le verre par frottement avec la laine est appelée **électricité positive**, l'électricité acquise par la résine par frottement avec une peau de chat est appelée **électricité négative**. Les corps électrisés se comportent les uns comme le verre frotté par la laine, les autres comme la résine frottée par une peau de chat.

2. **Deux corps chargés d'électricité de même nom se repoussent, deux corps chargés d'électricité de noms contraires s'attirent.**

89. CHARGES ÉLECTRIQUES. — Nous dirons que deux corps B et C ont des quantités électriques ou des charges électriques identiques si, placés à la même distance d d'un corps électrisé A (corps de référence), ils sont soumis à la même action (fig. 125).

Nous dirons qu'un corps C a une charge électrique double, triple,... d'un corps B si, placé à une distance d d'un corps électrisé A, il est

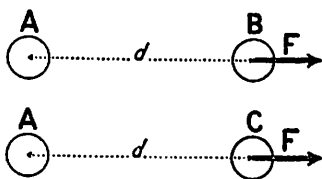


Fig. 125.

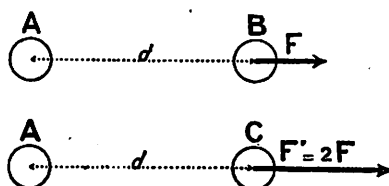


Fig. 126.

soumis à une action double, triple,... de l'action exercée sur le corps B placé à la même distance (fig. 126).

La charge électrique est donc une grandeur mesurable.

90. UNITÉS DE CHARGE. — 1^o **Unité électrostatique.** L'unité électrostatique de charge électrique, dans le système C. G. S., est la charge électrique qui, placée dans le vide à un centimètre de distance d'une charge électrique identique, la repousse avec une force d'une dyne.

Nous désignerons dorénavant les unités électrostatiques par l'abréviation *u e s.*

2^o **Unité pratique.** L'unité électrostatique étant trop petite, on utilise dans le système pratique le **coulomb (C)**. Le coulomb vaut $3 \cdot 10^9$ unités électrostatiques de charge.

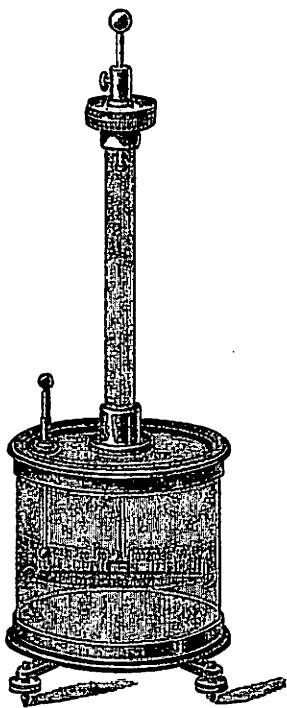


Fig. 127.

91. LOI DE COULOMB. — En utilisant une balance de torsion (fig. 127), semblable à la balance de Cavendish (Tome I, n^o 60), Coulomb (physicien français : 1736-1804) a montré que la force d'attraction ou de répulsion qui s'exerce entre deux corps électrisés est : a) directement proportionnelle aux charges q et q' des deux corps électrisés; b) inversement proportionnelle au carré de la distance d qui sépare les deux corps électrisés.

La loi de Coulomb s'exprime donc par une relation analogue à

celle de la loi de Newton (Tome I, n° 59) :

$$F = \pm \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{qq'}{d^2}$$

ϵ est un facteur de proportionnalité, appelé constante diélectrique, qui caractérise la nature du milieu séparant les deux corps électrisés. Il résulte de la définition de l'unité de charge électrique que, pour le vide, ϵ est égal à 1. Pour l'air et les gaz, ϵ est toujours voisin de 1; pour le pétrole, il est égal à 2, pour l'alcool à 26, pour l'eau pure à 80.

92. ÉLECTROSCOPES. — Les électroscopes sont des appareils qui servent à détecter l'état électrisé d'un corps.

a) Le double pendule est constitué de deux balles de sureau suspendues à deux fils conducteurs accrochés à un support isolé. Mises au contact d'un corps électrisé, les deux balles se chargent et se repoussent mutuellement (fig. 128).

b) L'électroscopé à feuilles d'or est constitué d'une tige conductrice en cuivre portant à l'une de ses extrémités deux feuilles d'or très

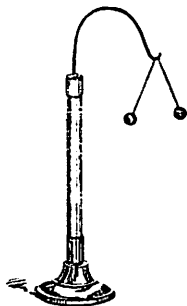


Fig. 128.

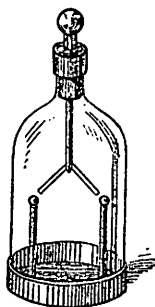


Fig. 129.

légères et à l'autre une boule métallique (fig. 129). Cette tige est fixée dans un flacon de verre qui protège les feuilles d'or des chocs et des courants d'air. Si un corps électrisé est mis en contact avec la boule qui surmonte la tige, l'électricité se répand dans la tige et dans les feuilles d'or : celles-ci se repoussent et divergent.

Les électroscopes permettent de déterminer le signe de la charge électrique portée par un corps électrisé. A cet effet, le corps électrisé est amené au voisinage des feuilles de l'électroscopé chargé positivement, par exemple : selon que les feuilles de l'électroscopé sont repoussées ou attirées par le corps électrisé, la charge de ce corps est positive ou négative.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer l'action d'une charge d'un coulomb sur une charge d'un coulomb distante de 1 km dans l'air et dans l'eau.

SOLUTION. — a) Dans l'air :

$$F = \pm \frac{1}{\epsilon} \frac{qq'}{d^2} ; F = 1 \cdot \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9}{10^{10}} = 9 \cdot 10^8 \text{ dyn} \neq 900 \text{ kg'}$$

b) Dans l'eau :

$$F = \pm \frac{1}{\epsilon} \frac{qq'}{d^2} ; F = \frac{1}{80} \cdot \frac{3 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^9}{10^{10}} = 1125 \cdot 10^4 \text{ dyn} \neq 11,25 \text{ kg'}$$

2. Deux sphères métalliques identiques sont placées dans l'air à une distance de 5 cms elles se repoussent avec une force de 20 dyn. Après avoir été amenées en contact, elles sont replacées à la même distance l'une de l'autre; elles se repoussent alors avec une force de 36 dyn. Calculer les charges des sphères métalliques avant contact.

SOLUTION. — a) Avant contact, l'application de la relation de Coulomb donne

$$20 = 1 \cdot \frac{q q'}{5^2}; \quad q q' = 500 \quad (1)$$

b) Après contact, la charge portée par chacune des sphères métalliques vaut $\frac{q + q'}{2}$; la relation de Coulomb conduit à

$$36 = 1 \cdot \frac{\left(\frac{q + q'}{2}\right)^2}{5^2}; \quad (q + q')^2 = 3600 \quad \text{et} \quad q + q' = 60 \quad (2)$$

Nous obtenons donc un système de deux équations (1) et (2) à deux inconnues qui conduit à

$$q = 50 \quad \text{et} \quad q' = 10 \quad \text{ou réciproquement.}$$

3. Deux sphères, l'une A chargée positivement (300 u e s) et l'autre B chargée négativement (200 u e s), sont distantes de 20 cm. En quel endroit sur la ligne des sphères doit-on placer une sphère C chargée négativement (50 u e s) pour que la sphère A reste immobile?

SOLUTION. — La force d'attraction à laquelle est soumise la sphère A de la part de la sphère B vaut :

$$F = 1 \cdot \frac{300 \cdot (-200)}{20^2} = -150 \text{ dyn.}$$

Cette force d'attraction de 150 dyn doit, pour qu'il y ait équilibre, être neutralisée par une force égale et de sens contraire. A cet effet, on dispose la sphère C à une distance de la sphère A telle que l'on ait :

$$-150 = 1 \cdot \frac{300 \cdot (-50)}{d^2}; \quad d^2 = 100; \quad d = 10 \text{ cm.}$$

La sphère C doit donc être placée à 10 cm de la sphère A (à 30 cm de la sphère B).

2. THÉORIE ÉLECTRONIQUE.

93. ÉLECTRONS. — Des faits expérimentaux que nous étudierons plus tard montrent que les charges électriques sont des multiples entiers d'une charge électrique élémentaire ou quantum d'électricité. Comme la matière, l'électricité a une structure discontinue.

Le granule d'électricité négative ou **électron** joue un rôle particulièrement important. Il a pu être isolé c'est-à-dire être obtenu sans support matériel (n° 198). Il a une charge de $4,8 \cdot 10^{-10}$ u e s de charge ou $1,6 \cdot 10^{-19}$ C et une masse de $9 \cdot 10^{-28}$ gramme (la masse de l'électron est 1835 fois plus petite que la masse de l'atome d'hydrogène).

94. ATOMES. — L'atome n'est pas, comme on l'avait admis au début de la théorie atomique, insécable. D'après Rutherford (physicien anglais : 1871-1937) et Bohr (physicien danois né en 1885), l'atome est constitué d'un **noyau** central, très petit, très lourd, chargé d'électricité positive. Le noyau, qui condense pratiquement toute la masse de l'atome, est entouré d'un essaim d'électrons planétaires comme le Soleil est entouré de planètes. La charge négative

totale des électrons neutralise la charge positive du noyau de sorte que l'atome est, par compensation, **électriquement neutre**.

95. IONS. — Tout atome qui perd un ou plusieurs électrons se transforme en **ion positif**. Tout atome qui capte un ou plusieurs électrons se transforme en **ion négatif**. L'ion positif redevient un atome en captant les électrons qui lui font défaut; l'ion négatif redevient un atome en perdant les électrons qu'il a en excès.

L'électricité positive est liée à un support matériel tandis que l'électricité négative se présente sous deux formes : les ions négatifs liés à un support matériel et les électrons libres sans support matériel.

96. INTERPRÉTATION DES PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX. — 1^o) **Electrisation par frottement.** — Lorsque nous frottons un bâton de verre avec une étoffe de drap, le verre cède des électrons au drap : donc, le verre s'électrise positivement et le drap s'électrise négativement.

2^o) **Conducteurs et isolants.** — Dans un **conducteur**, il y a des électrons qui ne sont pas rigidement liés à des atomes déterminés : ces électrons qui se déplacent aisément dans les espaces libres existant entre les atomes sont animés de mouvements désordonnés comme le sont les molécules des gaz. La théorie cinétique des gaz (Tome I, n^o 338) peut être appliquée aux électrons libres. Un apport d'électrons à un conducteur ne reste donc pas localisé à l'endroit où il se produit : les électrons amenés en un point du conducteur se répartissent sur toute la surface du conducteur à cause de leur répulsion mutuelle.

Dans un **isolant**, les électrons sont liés rigidement à des atomes déterminés par des forces considérables : les électrons ne sont pas libres de passer d'un atome à l'autre. Les sauts d'électrons d'un atome à l'autre ne se produisent que très difficilement. Un apport d'électrons à un isolant reste localisé à l'endroit où il se produit.

3^o) **Electrisation par contact.** — Tout corps présentant un excès d'électrons en cède au corps neutre avec lequel il est mis en contact : le corps neutre se charge négativement. Tout corps présentant un défaut d'électrons en capte au corps neutre avec lequel il est mis en contact : le corps neutre se charge positivement.

4^o) **Neutralisation d'un conducteur.** — Mis en contact par un conducteur avec le sol, un corps chargé négativement abandonne à la Terre des électrons dont il est chargé tandis qu'un corps chargé positivement prend à la Terre les électrons dont il est dépourvu : les corps électrisés, mis au sol, sont ramenés à l'état neutre. Ces échanges d'électrons entre la Terre et un corps électrisé mis au sol ne produisent pratiquement aucune variation de l'état électrique

de la Terre tout comme l'apport ou le retrait de quelques gouttes d'eau n'influe pas sur la masse d'eau de l'Océan.

Dans l'air cependant, un conducteur est, quoique isolé, ramené lentement à l'état neutre; en effet, les ions contenus dans l'air sont attirés par le conducteur dont ils neutralisent la charge.

§ 2. DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ.

97. LOCALISATION SUPERFICIELLE DE L'ÉLECTRICITÉ SUR UN CONDUCTEUR.

Expériences. — 1. Electrison, soit par frottement soit par contact avec une machine électrostatique, une sphère creuse en cuivre portée par un pied isolant. Recouvrons cette sphère de deux hémisphères métalliques que nous tenons par des manches isolants (fig. 130). Après contact, retirons-les simultanément. Nous constatons, au moyen de l'électroscope à feuilles d'or, que la sphère a perdu toute son électricité et que les hémisphères sont électrisés.

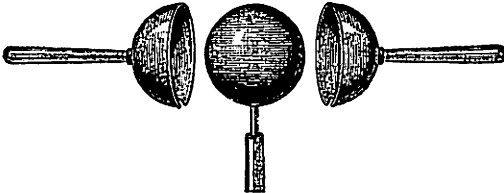


Fig. 130.

2. Electrison une sphère en laiton creuse et isolée (sphère de Coulomb) (fig. 131). Appliquons sur

la surface extérieure un plan d'épreuve : petit disque de clinquant tenu par un manche isolant. Nous observons, en le présentant à un électroscope, que le disque est électrisé. Introduisons ensuite le plan d'épreuve, préalablement ramené à l'état neutre, par l'ouverture aménagée dans la sphère et appliquons-le sur la surface intérieure de la sphère (fig. 131). Nous observons, au moyen de l'électroscope, que le plan d'épreuve n'a emporté aucune charge électrique.

3. Relions à une machine électrostatique une cage en treillis métallique dont les barreaux sont pourvus de pendules électriques. Nous remarquons que les pendules qui se trouvent à l'extérieur divergent fortement alors que les pendules qui se trouvent à l'intérieur n'accusent aucune charge électrique.

Conclusion. — L'électricité se porte exclusivement à la surface extérieure des conducteurs même si cette surface n'est pas continue.

Interprétation électronique. — Une sphère métallique électrisée négativement possède un excès d'électrons. Or, ces électrons, libres de se mouvoir, se repoussent mutuellement : ils vont s'éloigner le plus possible les uns des autres et viendront s'accumuler à la surface extérieure du conducteur.

Une sphère métallique électrisée positivement présente un défaut d'électrons : elle porte donc des ions positifs. Considérons deux ions

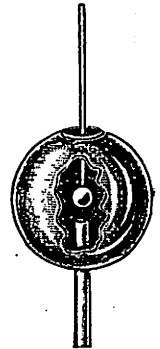


Fig. 131.

situés au centre du conducteur. Bien que ces deux ions se repoussent mutuellement, ils ne peuvent se déplacer : en effet, liés à la matière, ils ne sont pas mobiles. Ils captent des électrons à deux atomes plus voisins de la périphérie. Ces deux atomes deviennent des ions positifs qui répètent le même jeu. Au total, c'est donc à la surface extérieure du conducteur que se manifeste la pénurie d'électrons.

98. MESURE DES CHARGES ÉLECTRIQUES. — ÉLECTROMÈTRE. — La propriété remarquable de l'électricité de se porter intégralement à la surface extérieure des conducteurs va nous permettre de mesurer les charges électriques.

Remplaçons la boule de l'électroscope à feuilles d'or par un cylindre métallique creux appelé cylindre de Faraday (physicien et chimiste anglais : 1791-1867) (fig. 132). Électrisons une grande sphère portée sur un pied isolant. Appliquons le plan d'épreuve sur la sphère et amenons-le ensuite au contact avec la paroi interne du cylindre : toute la charge électrique emportée par le plan d'épreuve passe sur la surface extérieure du cylindre et sur l'électroscope : les feuilles d'or de l'électroscope divergent. Nous graduerons l'électroscope en notant les déviations $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots$ que prennent les feuilles d'or sous l'action de charges électriques $q, 2q, 3q, \dots$. L'électroscope gradué constitue un électromètre.

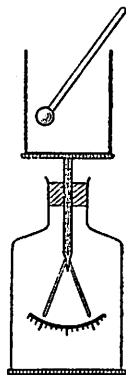


Fig. 132.

99. CONSERVATION DE L'ÉLECTRICITÉ.

Expérience. — Frottons l'un sur l'autre un plateau de verre et un plateau recouvert de drap que nous tenons par des manches isolants. Plongeons dans le cylindre de Faraday d'un électromètre le plateau de verre que nous amenons en contact avec la paroi du cylindre : les feuilles d'or divergent. Plongeons ensuite le plateau recouvert de drap que nous amenons en contact avec la paroi du cylindre : les feuilles d'or retombent et ne présentent plus le moindre écartement. Le frottement a donc fait apparaître sur le verre et sur le drap des quantités d'électricité égales mais de signes contraires.

Conclusion. — Nous ne pouvons donc faire apparaître une charge d'électricité positive sans faire apparaître en même temps une charge d'électricité négative rigoureusement égale. En généralisant cette conclusion, nous sommes amenés à prévoir le principe de la conservation de l'électricité : **Dans l'Univers, la quantité d'électricité reste constante.**

Interprétation électronique. — La conservation de l'électricité s'interprète aisément : puisque les électrons perdus par le verre sont captés par le drap, la charge positive est, en valeur absolue, égale à la charge négative du drap. Il s'ensuit que la somme des charges électriques du système verre-drap est nulle.

100. DENSITÉ ÉLECTRIQUE. — L'électricité se répartit-elle uniformément à la surface d'un conducteur? En d'autres termes, la

densité électrique σ c'est-à-dire la charge électrique par centimètre carré est-elle constante sur toute la surface d'un conducteur? Le plan d'épreuve et l'électromètre nous permettent de déterminer la répartition de l'électricité à la surface des conducteurs (fig. 133). L'expérience montre que la densité électrique sur une sphère électrisée isolée et éloignée de tout conducteur est constante;

que la densité électrique sur un ellipsoïde chargé, éloigné de tout conducteur, croît en allant de la partie médiane vers les extrémités; que la densité électrique sur un disque chargé, éloigné de tout conducteur, faible au centre du disque est très élevée sur les

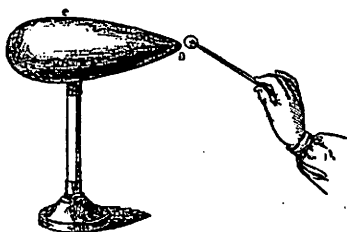


Fig. 133.



Fig. 134.

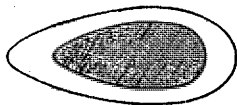


Fig. 135.



Fig. 136.

bords. D'une façon générale donc, la densité électrique augmente lorsque le rayon de courbure de la surface diminue. Sur les figures 134, 135 et 136, la distance qui sépare la courbe en traits pointillés de la surface du conducteur est proportionnelle à la densité électrique et la représente.

101. POUVOIR DES POINTES. — Si un conducteur électrisé présente des pointes, la densité électrique aux extrémités de ces pointes est, à cause de la grande courbure, très élevée et la force avec

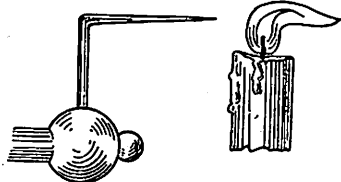


Fig. 137.



Fig. 138.

laquelle l'électricité tend à s'échapper du conducteur l'emporte sur la résistance que l'air oppose à cette fuite. L'air électrisé par la pointe est vivement repoussé. Le déplacement de l'air électrisé constitue le «vent électrique» qui se manifeste par son action sur la flamme d'une

bougie (fig. 137). Si la pointe est mobile, le vent électrique provoque une réaction qui met la pointe en mouvement : expérience du tourniquet électrique (fig. 138).

Le pouvoir des pointes s'interprète aisément.

Une pointe, placée sur un conducteur électrisé négativement, devient le refuge des électrons qui s'y accumulent en quantité énorme. Leur répulsion mutuelle peut atteindre une valeur telle que les électrons quittent la pointe et se fixent sur les molécules d'air. Ions négatifs de l'air et électrons de la pointe se repoussent mutuellement : d'où le vent électrique.

Sur un conducteur, muni d'une pointe et chargé positivement, la pénurie d'électrons se manifeste principalement à la pointe. L'attraction de cette pointe pour les électrons peut devenir tellement élevée que des électrons sont arrachés aux molécules d'air qui deviennent des ions positifs : ions positifs de l'air et ions positifs de la pointe se repoussent mutuellement : d'où le vent électrique.

§ 3. CHAMP ÉLECTRIQUE.

102. CHAMP DE PESANTEUR ET CHAMP ÉLECTRIQUE.

1°) Notion de champ.

Il résulte de la loi de Newton que la Terre exerce une action sur tout corps matériel situé dans son voisinage. La région de l'espace dans laquelle la Terre exerce une influence est

Il résulte de la loi de Coulomb qu'un corps électrisé exerce une action sur toute charge électrique située dans son voisinage. La région de l'espace dans laquelle le corps

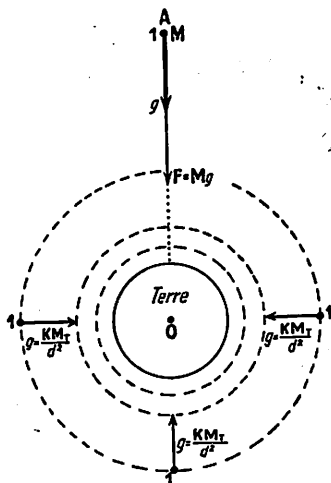


Fig. 139.

le siège d'un champ de pesanteur (fig. 139).

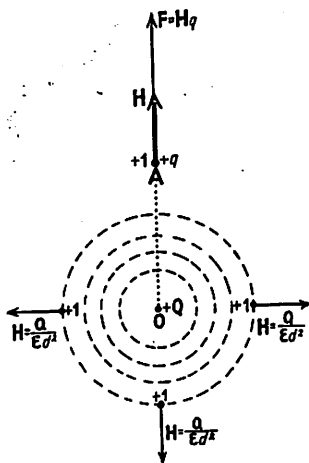


Fig. 140.

électrisé exerce une influence est le siège d'un champ électrique (fig. 140).

Mais l'influence exercée par la Terre varie d'un point à l'autre de l'espace. Pour caractériser l'influence de la Terre en un point A, on imagine qu'une masse unitaire soit placée en ce point : elle y serait soumise à une force dont la direction, le sens et l'intensité donnent, par définition, la direction, le sens et l'intensité du champ de pesanteur en ce point. Le champ de pesanteur est donc une grandeur vectorielle que l'on désigne par le symbole \vec{g} .

Il résulte de la définition du champ de pesanteur qu'une masse M subit, dans un champ de pesanteur \vec{g} , une force \vec{F} dont l'intensité exprimée en dynes est donnée par la relation

$$\vec{F} = M\vec{g}.$$

2^o) Lignes de force.

Supposons qu'une masse unitaire puisse se déplacer librement dans un champ de pesanteur : elle se déplace en suivant en chaque point la direction du vecteur champ en ce point. La trajectoire décrite par l'unité de masse est une ligne de force du champ de pesanteur. Le vecteur champ est en chaque point tangent à la ligne de force.

Le sens d'une ligne de force est, par convention, défini par le sens selon lequel se déplace la masse.

Mais l'influence exercée par le corps électrisé varie d'un point à l'autre de l'espace. Pour caractériser l'influence d'un corps électrisé en un point A, on imagine qu'une charge unitaire positive soit placée en ce point : elle y serait soumise à une force dont la direction, le sens et l'intensité donnent, par définition, la direction, le sens et l'intensité du champ électrique en ce point. Le champ électrique est donc une grandeur vectorielle que l'on désigne par le symbole \vec{H} .

Il résulte de la définition du champ électrique qu'une charge électrique q subit, dans un champ électrique \vec{H} , une force \vec{F} dont l'intensité exprimée en dynes est donnée par la relation

$$\vec{F} = q\vec{H}.$$

Supposons qu'une charge électrique positive unitaire puisse se déplacer librement dans un champ électrique : elle se déplace en suivant en chaque point la direction du vecteur champ en ce point. La trajectoire décrite par l'unité de charge est une ligne de force du champ électrique. Le vecteur champ est en chaque point tangent à la ligne de force.

Le sens d'une ligne de force est, par convention, défini par le sens selon lequel se déplace la charge électrique positive.

103. CHAMP D'UNE CHARGE PONCTUELLE.

La Terre agit comme si toute la masse M_T était concentrée

Considérons une charge électrique Q positive ponctuelle. En

au centre. En un point A situé à une distance d du centre de la Terre, le champ de pesanteur g est, par définition, la force que subit en ce point une masse unitaire. La loi de Newton permet de calculer cette force

$$\vec{g} = K \frac{M_T \cdot 1}{d^2}.$$

$$\vec{g} = K \frac{M_T}{d^2}.$$

Le champ a la direction de la droite OA (fig. 139).

Les lignes de force sont des droites convergeant de toutes les directions (verticales) vers le centre de la Terre.

L'intensité du champ de pesanteur diminue tout le long de ces lignes de force à mesure qu'on s'éloigne du point O.

Les lieux géométriques des points d'égale intensité du champ de pesanteur sont des surfaces sphériques de centre O.

104. CHAMP UNIFORME.

Dans un espace restreint, les verticales peuvent être considérées comme parallèles et l'intensité du champ de pesanteur comme constante : le champ de pesanteur y est dit **uniforme**.

un point A situé à une distance d de cette charge, le champ électrique H est, par définition, la force que subit en ce point une charge électrique positive unitaire. La loi de Coulomb permet de calculer cette force

$$\vec{H} = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q \cdot 1}{d^2}.$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{d^2}.$$

Le champ a la direction de la droite OA (fig. 140).

Les lignes de force sont des droites issues de la charge électrique et rayonnant dans toutes les directions.

L'intensité du champ électrique diminue tout le long de ces lignes de force à mesure qu'on s'éloigne du point O.

Les lieux géométriques des points d'égale intensité du champ électrique sont des surfaces sphériques de centre O.

Si les lignes de force sont, dans un espace déterminé, parallèles et si l'intensité du champ électrique est constante, le champ électrique y est dit **uniforme**.

Entre deux plateaux parallèles chargés l'un positivement et l'autre négativement, le champ électrique est uniforme.

105. SPECTRES ÉLECTRIQUES. — Tandis que les lignes de force du champ de pesanteur sont matérialisées par des fils à plomb, les lignes de force du champ électrique sont matérialisées par des

effilochures de soie, des petits cheveux amenés au voisinage du conducteur ou par de la sciure de bois en suspension dans de l'huile de paraffine.

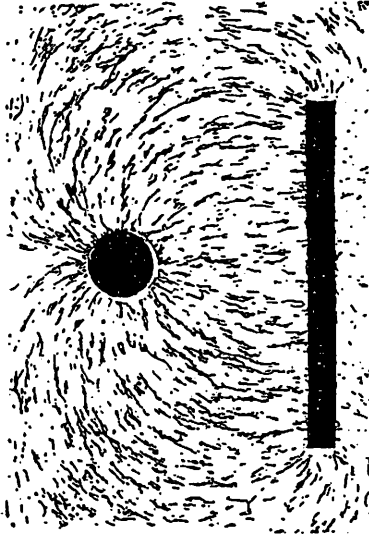


Fig. 141.

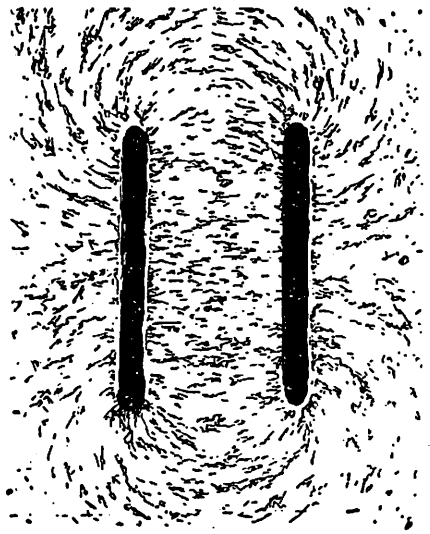


Fig. 142.

Dans le cas de conducteurs chargés quelconques, les lignes de force normales aux surfaces des conducteurs s'incurvent d'une façon plus ou moins compliquée (fig. 141). Dans le cas de deux plateaux parallèles chargés l'un positivement et l'autre négativement, les lignes de force sont parallèles dans la région de l'espace séparant les deux plateaux (fig. 142).

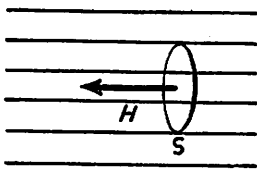


Fig. 143.

106. FLUX ELECTRIQUE. —

Considérons une surface S disposée perpendiculairement aux lignes de force d'un champ électrique uniforme d'intensité H (fig. 143). Nous appellerons flux électrique F à travers la surface S le produit de la surface S par l'intensité H du champ.

$$F = HS$$

Si la surface S n'est pas normale au vecteur champ (fig. 144), le flux électrique F est égal au produit de l'intensité H du champ par la surface efficace S' , projection de la surface réelle S sur le plan normal du vecteur champ

$$F = HS \cos \alpha$$

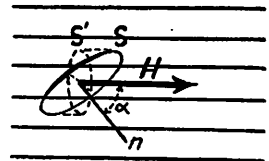


Fig. 144.

α étant l'angle que fait avec le vecteur champ H la normale n à la surface S .

§ 4. POTENTIEL.

107. NOTION DE POTENTIEL. ANALOGIE HYDRAULIQUE. — Une analogie hydraulique va nous permettre d'expliquer la notion de potentiel électrique.

1. Considérons un récipient à fond irrégulier rempli d'eau (fig. 145). Un tube gradué,

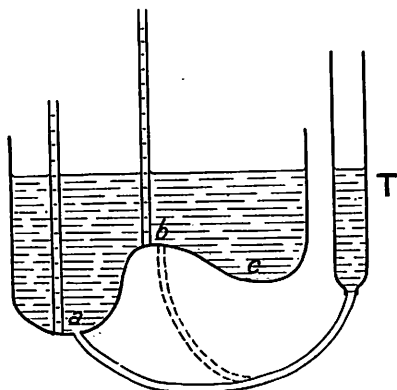


Fig. 145.

plongé verticalement jusqu'au fond du récipient successivement en des points *a*, *b*, *c*,..., emporte des quantités d'eau qui nous renseignent sur la hauteur du liquide en ces différents points.

2. Mettons le récipient en communication au moyen d'un tuyau en caoutchouc de faible section avec un tube vertical T (fig. 145).

De l'eau s'écoule du récipient dans le tube et y atteint le même niveau que dans le récipient. Or, quel que soit le point du récipient mis en communication avec le tube T, le niveau de l'eau dans ce tube reste constant.

La hauteur du liquide mesurée à partir du fond du récipient varie d'un point à l'autre; cependant en chaque point de

1. Considérons un conducteur de forme ovoïde, par exemple, chargé d'électricité (fig. 146). Un plan d'épreuve, appliqué successivement en des points *a*, *b*, *c*,..., emporte des

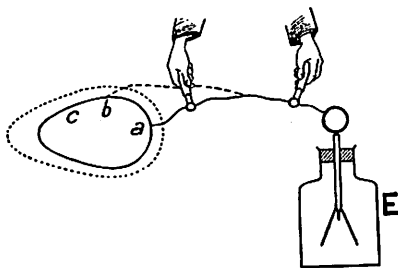


Fig. 146.

charges électriques qui, portées dans le cylindre de Faraday d'un électromètre, nous renseignent sur la densité électrique en ces différents points (n° 98).

2. Mettons le conducteur en communication au moyen d'un fil métallique de faible section avec un électromètre éloigné (fig. 146).

De l'électricité s'écoule du conducteur à l'électromètre dont les feuilles d'or divergent d'un certain angle. Or, quel que soit le point du conducteur mis en communication avec l'électromètre, l'écartement des feuilles d'or reste constant.

La densité électrique varie à la surface du conducteur; cependant il règne en chaque point du conducteur un état

la surface libre du liquide règne un état d'équilibre constant que nous appellerons **niveau hydrostatique**.

3. Si nous réunissons par un tube de caoutchouc de faible section deux vases contenant de l'eau au **même niveau**, il ne se produit aucun changement : le

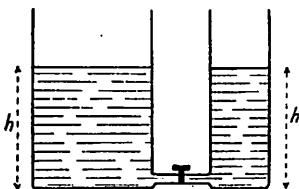


Fig. 147.

niveau n'a pas varié, les quantités d'eau contenues dans les vases sont restées les mêmes (fig. 147).

4. Si nous réunissons par un tube de caoutchouc de faible section deux vases contenant de l'eau à des **niveaux différents**, du liquide s'écoule du vase au niveau le plus élevé vers le vase au niveau le moins élevé jus-

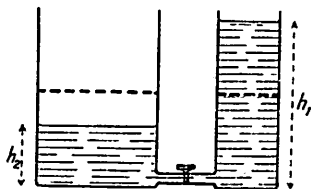


Fig. 149.

qu'à ce que l'eau atteigne un même niveau dans les deux vases (fig. 149).

électrique constant (mis en évidence par l'écartement constant des feuilles d'or de l'électromètre) que nous appellerons **niveau électrique** ou mieux **potentiel électrique**.

3. Si nous réunissons par un fil métallique de faible section deux conducteurs qui sont au **même niveau électrique**, au **même potentiel**, il ne se pro-

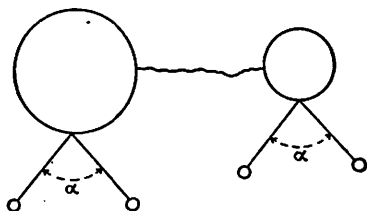


Fig. 148.

duit aucun changement; le potentiel n'a pas varié, les charges électriques portées par les conducteurs sont restées les mêmes (fig. 148).

4. Si nous réunissons par un fil métallique de faible section deux conducteurs qui se trouvent à des **niveaux électriques différents**, à des **potentiels différents**, de l'électricité s'écoule du conducteur au po-

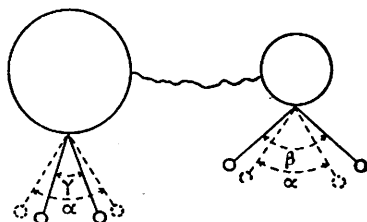


Fig. 150.

tentiel le plus élevé vers le conducteur au potentiel le moins élevé jusqu'à ce que les deux conducteurs soient au même potentiel (fig. 150).

5. Un réservoir d'eau relié à la mer se met au niveau de la mer. Le **niveau de la mer** peut donc, conventionnellement, être pris comme **repère zéro des niveaux**.

5. Un conducteur électrisé mis en communication avec le sol se met au potentiel du sol. Le **potentiel du sol** peut donc, conventionnellement, être pris comme **repère zéro des potentiels**. Conventionnellement, nous considérons qu'un conducteur chargé positivement est à un potentiel supérieur à celui de la terre; qu'un conducteur chargé négativement est à un potentiel inférieur à celui de la terre.

108. CARACTÉRISATION DU POTENTIEL PAR LE TRAVAIL. — ANALOGIE GRAVIFIQUE. — Pour préciser la notion de potentiel, nous allons faire appel à une analogie empruntée à la physique de la pesanteur.

1. Autour de la Terre règne un champ de pesanteur.

Le champ de pesanteur est caractérisé par ses lignes de force : trajectoires décrites par un corps qui tombe, soumis uniquement à la pesanteur (fig. 151).

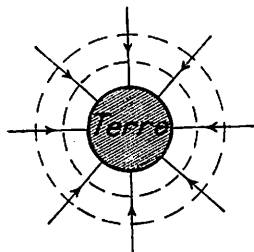


Fig. 151.

2. Si nous déplaçons une masse M de A en B (fig. 153) perpendiculairement aux lignes de force du champ de pesanteur, le travail effectué par la pesanteur est nul. Le plan horizontal dans lequel s'est fait le déplacement est une surface équipotentielle car, en s'y dé-

1. Autour d'un corps électrisé règne un champ électrique.

Le champ électrique est caractérisé par ses lignes de force : trajectoires décrites par un corps mobile chargé positivement (fig. 152).

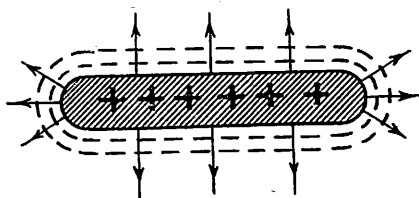


Fig. 152.

2. Si nous déplaçons une charge électrique Q de A en B (fig. 154) de manière que le déplacement se fasse toujours perpendiculairement aux lignes de force du champ électrique, le travail effectué par la force électrique à laquelle est soumise la charge Q est nul. La

plaçant, l'énergie potentielle de la masse M n'a pas varié. En reportant la même opération à partir du point A dans toutes les directions, nous détermi-

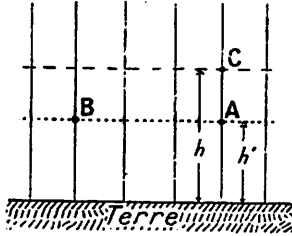


Fig. 153.

nerons une surface équipotentielle.

Mais si nous déplaçons la masse M de A en C parallèlement aux lignes de force, il faut effectuer un travail qui est fonction de la différence de niveau existant entre A et C . Si les niveaux en A et C sont respectivement h' et h , le travail effectué vaut

$$T = Mg(h - h').$$

Si la masse M est amenée du niveau 0 au niveau h , la relation devient

$$T = Mgh.$$

Conclusion. — Le travail qu'il faut fournir pour amener du sol à la surface d'un conducteur électrisé une charge d'électricité positive égale à l'unité mesure le potentiel électrique de ce conducteur.

$$V = \frac{T}{Q}$$

ligne suivant laquelle s'est fait le déplacement est une ligne équipotentielle car, en s'y déplaçant, l'énergie potentielle de la charge Q n'a pas varié. En

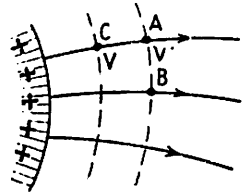


Fig. 154.

répétant la même opération à partir du point A dans toutes les directions, nous déterminerons une surface équipotentielle.

Mais si nous déplaçons la charge électrique Q de A en C parallèlement à la ligne de force, il faut effectuer un travail qui est fonction de la différence de potentiel régnant entre A et C . Si les potentiels régnant en A et C sont respectivement V' et V , le travail effectué vaut

$$T = Q(V - V').$$

Si la charge électrique Q est amenée du potentiel 0 au potentiel V , la relation devient

$$T = QV.$$

109. UNITÉS DE POTENTIEL.

1°) **Unité électrostatique.** — La relation $V - V' = T/Q$ permet de fixer les unités de différence de potentiel.

L'unité électrostatique de différence de potentiel est la différence de potentiel qui existe entre deux points tels qu'il faut mettre en jeu un travail d'un erg pour amener d'un point à l'autre une unité électrostatique de charge.

$$1 \text{ u e s de différence de potentiel} = \frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ u e s de charge}}$$

2°) **Unité pratique.** — Dans le système pratique, on emploie le volt (V) du nom de Volta (physicien italien : 1745-1827), différence de potentiel existant entre deux points tels qu'il faut mettre en jeu un travail d'un joule pour amener d'un point à l'autre une charge d'un coulomb.

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}}$$

3°) **Relation entre le volt et l'unité électrostatique.** — En remplaçant dans la relation précédente

1 joule par 10^7 ergs et 1 coulomb par $3 \cdot 10^9$ u e s de charge, il vient

$$1 \text{ volt} = \frac{10^7 \text{ ergs}}{3 \cdot 10^9 \text{ u e s de charge}} = \frac{1}{300} \text{ u e s de potentiel.}$$

***110. POTENTIEL ET CHAMP ÉLECTRIQUE.** — Il existe une relation simple entre la différence de potentiel entre deux points et le champ électrique, lorsque ce champ est uniforme. En effet, si V_A et V_B représentent respectivement les potentiels aux points A et B distants l'un de l'autre de d cm, le travail exprimé en ergs à fournir pour faire passer une charge d'une unité électrostatique du point B au point A vaut (n° 108) :

$$T = 1 \cdot (V_A - V_B).$$

Puisque le champ électrique est uniforme, ce travail, produit de la force par le déplacement, est aussi exprimé par la relation :

$$T = H \cdot d.$$

D'où nous tirons :

$$V_A - V_B = Hd$$

ou

$$H = \frac{V_A - V_B}{d}$$

Un champ électrique uniforme peut donc être mesuré par la différence de potentiel régnant entre deux points distants d'un centimètre dans le sens des lignes de force.

111. POTENTIEL CRÉÉ PAR UNE CHARGE PONCTUELLE. — Considérons une charge ponctuelle positive Q disposée dans l'air au point O (fig. 155). Les champs créés par la charge Q

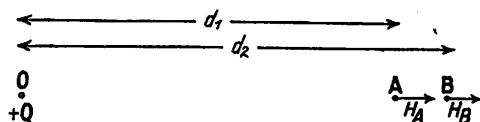


Fig. 155.

aux points A et B distants respectivement du point O de d_1 et de d_2 sont

$$H_A = \frac{Q}{d_1^2} \quad \text{et} \quad H_B = \frac{Q}{d_2^2}.$$

Si d_1 est très voisin de d_2 , le champ entre les points A et B vaut très approximativement

$$H = \frac{Q}{d_1 d_2}.$$

Pour faire passer une charge unitaire positive de B en A, il faut fournir un travail T qui mesure la différence de potentiel ($V_A - V_B$) régnant entre les points A et B.

$$T = 1 \cdot (V_A - V_B).$$

Or, le travail T vaut

$$T = H (d_2 - d_1).$$

La différence de potentiel ($V_A - V_B$) régnant entre les points A et B vaut donc

$$V_A - V_B = H (d_2 - d_1);$$

$$V_A - V_B = \frac{Q}{d_1 d_2} (d_2 - d_1);$$

$$V_A - V_B = \frac{Q}{d_1} - \frac{Q}{d_2}.$$

Le potentiel créé dans l'air à une distance d d'une charge ponctuelle Q vaut donc

$$V = \frac{Q}{d}.$$

Dans un milieu autre que l'air, le potentiel créé à une distance d d'une charge ponctuelle Q vaut

$$V = \frac{Q}{\epsilon d}.$$

112. POTENTIEL A LA SURFACE D'UN CONDUCTEUR SPHÉRIQUE. — La loi de Coulomb permet de montrer que la charge électrique d'une sphère électrisée se comporte comme si elle était concentrée en son centre. La surface du conducteur étant une surface équipotentielle (condition de l'équilibre électrostatique) située à une distance r du centre de courbure, le potentiel à la surface du conducteur est (1)

$$V = \frac{Q}{r}.$$

§ 5. CAPACITÉ.

113. CAPACITÉ ÉLECTRIQUE. — Si nous fournissons à un conducteur isolé une charge électrique Q , il acquiert un potentiel V ; si nous lui fournissons une charge $2Q, 3Q, \dots$, il acquiert un potentiel $2V, 3V, \dots$. Le rapport Q/V de la charge au potentiel est constant. Ce rapport constant est appelé **capacité électrique** du conducteur. Nous désignerons la capacité d'un conducteur par la lettre C . Nous avons donc :

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{ou} \quad \boxed{Q = CV}$$

114. — UNITÉS DE CAPACITÉ. — La relation $C = Q/V$ permet de fixer les unités de capacité.

1°) **Unité électrostatique.** — La capacité d'un conducteur est d'une unité électrostatique lorsqu'une unité électrostatique de charge le porte, à partir du potentiel zéro, à une unité électrostatique de potentiel.

$$1 \text{ u e s de capacité} = \frac{1 \text{ u e s de charge}}{1 \text{ u e s de potentiel}}$$

(1) *La densité électrique*

$$\sigma = \frac{Q}{S}; \quad \sigma = \frac{Vr}{4\pi r^2}; \quad \sigma = \frac{V}{4\pi r}$$

est directement proportionnelle au potentiel du conducteur et inversement proportionnelle au rayon de courbure du conducteur. L'influence du rayon de courbure sur la densité nous explique le pouvoir des pointes.

2°) **Unité pratique.** — Dans le système pratique, on emploie le **farad (F)**, capacité d'un conducteur qu'une charge d'un coulomb porte à un potentiel d'un volt.

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}}$$

3°) **Relation entre le farad et l'unité électrostatique.** — En remplaçant dans la relation précédente

1 coulomb par $3 \cdot 10^9 \text{ u e s}$ de charge et 1 volt par $\frac{1}{3} \cdot 10^{-2} \text{ u e s}$ de potentiel, il vient

$$1 \text{ farad} = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ u e s de charge}}{\frac{1}{3} \cdot 10^{-2} \text{ u e s de potentiel}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ u e s de capacité.}$$

On se sert communément du **microfarad (μF)** qui vaut un millionième de farad et du **picofarad ($p\text{F}$)** qui vaut un milliardième de microfarad.

115. CAPACITÉ D'UNE SPHÈRE. — La relation (n° 113)

$$Q = CV$$

et la relation (n° 112)

$$V = Q/r$$

montrent que la capacité en *u e s* d'une sphère est égale au rayon en *cm*

$$C_{\text{ u e s }} = r_{\text{ cm }}$$

Le farad est donc la capacité d'une sphère de $9 \cdot 10^{11} \text{ cm}$ de rayon c'est-à-dire d'une sphère de rayon 1500 fois celui de la Terre. Nous comprenons dès lors la raison pour laquelle on exprime généralement les capacités en microfarads ou en picofarads.

116. ASSOCIATION DE CAPACITÉS. — Considérons deux conducteurs de capacités différentes C_1 et C_2 au même potentiel V . La charge électrique Q_1 du premier conducteur est

$$Q_1 = C_1 V.$$

La charge électrique Q_2 du second conducteur est

$$Q_2 = C_2 V.$$

Mettons en communication les deux conducteurs par un fil de capacité négligeable. Après la communication, la charge totale Q n'a pas varié et vaut

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Désignons par C la capacité de l'association des deux conducteurs. Nous avons

$$Q = CV$$

puisqu'il ne s'est produit aucune variation de potentiel. En remplaçant dans cette dernière relation Q par la somme $(Q_1 + Q_2)$, nous obtenons :

$$CV = Q_1 + Q_2$$

$$CV = C_1V + C_2V$$

$$C = C_1 + C_2.$$

La capacité de l'association est égale à la somme des capacités des conducteurs qui la constituent.

117. PARTAGE DE L'ÉLECTRICITÉ ENTRE DEUX CONDUCTEURS. — Considérons deux conducteurs de capacités différentes C_1 et C_2 à des potentiels différents V_1 et V_2 . La charge électrique Q_1 du premier conducteur est

$$Q_1 = C_1V_1.$$

La charge électrique Q_2 du second conducteur est

$$Q_2 = C_2V_2.$$

Mettons en communication les deux conducteurs : ils se mettent au même potentiel V . Après la communication, la charge totale Q n'a pas varié et vaut :

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

La capacité C de l'ensemble formé est

$$C = C_1 + C_2.$$

Nous avons donc :

$$C_1V_1 + C_2V_2 = (C_1 + C_2)V$$

et

$$V = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2}.$$

Si l'un des conducteurs était à l'état neutre, la relation précédente devient ($V_2 = 0$)

$$V = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1.$$

118. MESURE DES POTENTIELS PAR L'ÉLECTROMÈTRE. — Pour mesurer le potentiel V_1 d'un conducteur, on le met en communication avec un électromètre à l'état neutre par un fil long et mince. L'électromètre se charge. Le potentiel V de l'ensemble

constitué par le conducteur et l'électromètre vaut, C_1 et C_2 désignant respectivement les capacités du conducteur et de l'électromètre,

$$V = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1.$$

Comme la capacité C_2 de l'électromètre est petite relativement à la capacité C_1 du conducteur, le potentiel V_1 du conducteur n'a pratiquement pas varié. D'autre part, la charge q fournie à l'électromètre est donnée par la relation

$$q = C_2 V.$$

Or, puisque le potentiel V est sensiblement égal au potentiel V_1 , on a

$$q = C_2 V_1.$$

La charge prise par l'électromètre est proportionnelle au potentiel du conducteur. La mesure de cette charge (n° 113) permet donc la mesure du potentiel.

119. ÉNERGIE POTENTIELLE D'UN CONDUCTEUR ÉLECTRISÉ. — Considérons un conducteur qu'une charge Q a porté au potentiel V . En se déchargeant, ce conducteur fournit un travail. Que vaut ce travail? Au fur et à mesure que le conducteur se décharge, le potentiel du conducteur diminue : au début de la décharge, le potentiel est V ; à la fin de la décharge, le potentiel est 0. En somme, tout se passe donc comme si toute la charge Q s'était

écoulée du potentiel moyen $\frac{V + 0}{2}$. L'énergie dégagée lors de la décharge vaut donc :

$$T = \frac{1}{2} QV$$

C'est cette énergie que possédait, à l'état potentiel, le conducteur chargé.

L'énergie électrique s'exprime en ergs si on adopte les unités électrostatiques, en joules si on adopte les unités pratiques.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Sachant qu'il a fallu mettre en jeu 0,3 J pour faire passer d'un point à un autre une charge de 5 mC, déterminer la différence de potentiel qui règne entre ces points.

SOLUTION. — Par application de la formule : $T = Q(V - V')$, il vient

$$V - V' = \frac{T}{Q}; \quad V - V' = \frac{0,3}{0,005} = 60 \text{ V.}$$

2. Un conducteur isolé, dont la capacité est de 4 μ F, est au potentiel de 500 V. Quelle charge porte ce conducteur? Quelle en est l'énergie potentielle?

SOLUTION. — Par application de la formule : $C = Q/V$, il vient :

$$Q = CV; Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ C.}$$

$$T = \frac{1}{2} QV; T = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^2 = 0,5 \text{ J.}$$

3. Calculer la capacité électrique de la Terre (rayon terrestre : 6 370 km).

SOLUTION. — La capacité électrique d'une sphère exprimée en *ues* de capacité a la même valeur numérique que son rayon exprimé en cm.

$$C = R$$

$$C = \frac{637 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^{11}} \text{ F} = 708 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 708 \mu\text{F.}$$

4. Une sphère dont la capacité est de 50 *ues* est au potentiel de 15 000 V; un conducteur qui est au potentiel de 6 000 V est mis en communication lointaine avec cette sphère et acquiert de ce fait un potentiel de 9 000 V. Calculer la capacité du conducteur.

SOLUTION. — Appliquons la formule : $C_1V_1 + C_2V_2 = (C_1 + C_2)V$, nous obtenons

$$50 \cdot \frac{15\,000}{300} + C_2 \cdot \frac{6\,000}{300} = (50 + C_2) \frac{9\,000}{300}$$

$$C_2 = 100 \text{ ues de capacité.}$$

§ 6. INFLUENCE ÉLECTROSTATIQUE.

120. PHÉNOMÈNE D'INFLUENCE.

Expérience. — Approchons lentement d'un électroscope non chargé un barreau de verre électrisé positivement. Bien qu'il n'y ait pas contact entre le barreau et la boule de l'électroscope, les feuilles d'or divergent : l'électroscope est électrisé (fig. 156).

Sans avoir touché la boule de l'électroscope, éloignons le barreau électrisé; les feuilles d'or retombent : l'électroscope est ramené à l'état neutre.



Conclusion. — Un conducteur isolé amené dans le champ électrique d'un corps électrisé s'électrise par **influence**. Le corps qui influence est appelé **inducteur**, le corps qui est influencé est appelé **induit**.

Les charges électriques développées par influence sur l'induit sont équivalentes puisque l'induit revient à l'état neutre lorsqu'on en éloigne l'inducteur. Il est clair que si l'inducteur est chargé positivement, les charges négatives induites se disposent sur l'induit le plus près possible de l'inducteur tandis que les charges positives induites sont repoussées sur l'induit le plus loin possible de l'inducteur. Le fait que des charges électriques de signes contraires puissent se séparer sur un même conducteur est dû au voisinage de l'inducteur. Ces charges se recombinent, du reste, dès que l'inducteur est éloigné.

Interprétation électronique. — Les électrons libres de l'électroscope, attirés par les ions positifs de l'inducteur, s'accablent sur la boule de l'électroscope : il y a formation de deux pages d'électricité différentes sur l'électroscope.

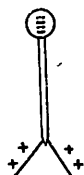


Fig. 156.

121. ÉLECTRISATION PAR INFLUENCE.

Expérience. — Approchons d'un électroscope un barreau de verre chargé positivement ; les feuilles divergent. Mettons ensuite l'électroscope en communication avec le sol en le touchant du doigt ; les feuilles retombent, quel que soit le point de l'électroscope qui ait été touché. Rompons la communication avec le sol et éloignons l'inducteur ; les feuilles divergent.

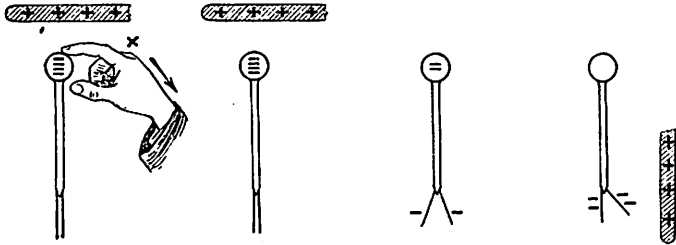


Fig. 157.

L'électroscope est donc chargé. Approchons latéralement le barreau inducteur de l'électroscope ; les feuilles d'or sont attirées par le barreau : les feuilles sont donc électrisées négativement (fig. 157).

Conclusion. — La mise au sol d'un conducteur sous l'influence d'un inducteur nous permet de charger ce conducteur d'électricité de signe contraire à l'électricité de l'inducteur.

Interprétation électronique. — Lorsque nous mettons l'électroscope influencé en communication avec le sol, des électrons issus de la Terre neutralisent les ions positifs de la plage positive. Quant aux électrons de la plage négative, ils ne s'écoulent pas dans le sol car ils sont maintenus par les ions positifs de l'inducteur. Lorsqu'après avoir rompu la communication avec le sol, nous éloignons l'inducteur, les électrons se répartissent à la surface de l'électroscope.

122. ÉCRANS ÉLECTRIQUES.

Expériences. — Interposons entre l'inducteur et l'induit une lame de verre, une lame de résine, une lame de paraffine... les phénomènes d'influence n'en sont nullement empêchés.

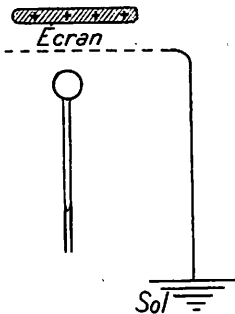


Fig. 158.

Interposons entre l'inducteur et l'induit une plaque métallique, une toile métallique... reliée à la terre, les phénomènes d'influence ne se produisent plus (fig. 158).

Conclusions. — Les corps isolants, n'empêchant pas les phénomènes d'influence, ne forment pas écran et sont appelés pour cette raison diélectriques.

Les corps conducteurs reliés au sol forment écran, ils limitent le champ électrique de l'inducteur.

Interprétation électronique. — Les électrons maintenus sur l'écran par les ions positifs de l'inducteur neutralisent l'action de l'inducteur sur le conducteur disposé au delà de l'écran.

Les électrons d'un diélectrique ne pouvant se déplacer, les atomes s'orientent de façon à disposer les électrons vers l'inducteur : outre une plage négative, le diélectrique présente donc une plage positive qui influence les corps disposés au delà du diélectrique. L'orientation des atomes ou polarisation du diélectrique est la cause pour laquelle les diélectriques ne forment pas écran.

123. EXPLICATION DE L'ATTRACTION DES CORPS LÉGERS. — Lorsque nous approchons un bâton de verre électrisé de la balle de sureau d'un pendule électrique, la balle s'électrise par influence (fig. 159). L'hémisphère la plus rapproché du bâton de verre se couvre d'électricité négative; l'hémisphère le plus éloigné, d'électricité positive. Bien que les charges électriques induites soient équivalentes, l'attraction exercée sur l'hémisphère négatif l'emporte sur la répulsion exercée sur l'hémisphère positif.

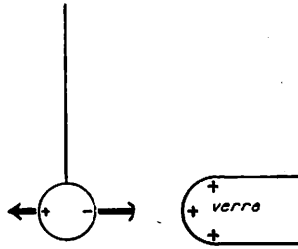


Fig. 159.

§ 7. CONDENSATEURS.

124. INFLUENCE ET CAPACITÉ.

Expérience. — Chargeons un électromètre; les feuilles d'or nous indiquent un potentiel V tel que (n° 113)

$$q = CV.$$

Amenons dans le voisinage de l'électromètre un conducteur quelconque (la main, par exemple); nous observons que les feuilles d'or se rapprochent. Le potentiel de l'électromètre a donc diminué. Puisque la charge q portée par l'électromètre est restée constante, c'est que la capacité de l'électromètre a augmenté. L'expérience nous montre que cette variation de la capacité de l'électromètre est à attribuer au phénomène d'influence.

Conclusion. — La capacité d'un conducteur dépend donc des corps qui l'entourent.

125. PRINCIPE DES CONDENSATEURS.

1^o) Un plateau métallique P muni d'un double pendule électrique est mis en communication avec une machine électrostatique de potentiel constant (fig. 160). Le plateau P reçoit une charge Q et acquiert le potentiel V que caractérise l'écart α du double pendule. La communication entre la machine électrique et le plateau P étant rompue, approchons un plateau métallique P' isolé et à l'état neutre (fig. 161). L'écart du double pendule diminue au fur et à mesure que le plateau P' s'approche davantage du plateau P . Le potentiel du plateau P diminue donc également.

La capacité du plateau P augmente avec le rapprochement du plateau P'.

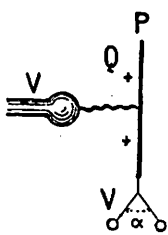


Fig. 160.

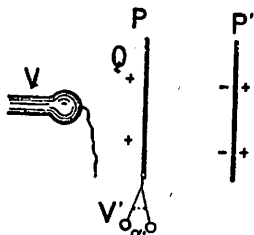


Fig. 161.

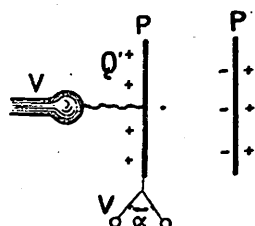


Fig. 162.

2°) Laissons le plateau P' en place; le plateau P est au potentiel V' que caractérise l'écart α' du double pendule. Mettons de nouveau le plateau P en communication avec la machine électrique (fig. 162). Le potentiel V de la machine étant supérieur au potentiel V' du plateau P, le plateau P reçoit une charge supplémentaire et acquiert de nouveau le potentiel V que caractérise l'écart α du double pendule.

La présence seule du plateau P' nous a permis d'accumuler, de condenser de l'électricité sur le plateau P. Le plateau P est appelé **collecteur**; le plateau P', **condenseur**. L'ensemble des conducteurs P et P' (armatures) et du diélectrique (air) qui les sépare est appelé **condensateur**.

3°) Mettons le plateau P' au sol (fig. 163). L'écart du pendule électrique et, par conséquent, le potentiel du plateau P diminuent de nouveau. Pour

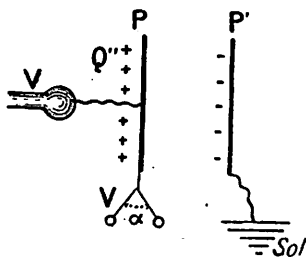


Fig. 163.

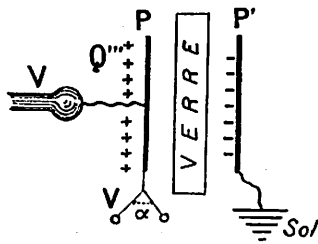


Fig. 164.

ramener le plateau P au potentiel V, il faut lui fournir une nouvelle charge supplémentaire.

La capacité du collecteur augmente par la mise au sol du condenseur.

4°) Interposons entre le plateau P et le plateau P' une lamelle d'un diélectrique (mica, verre, paraffine) (fig. 164). L'écart du pendule électrique et, par conséquent, le potentiel du plateau P diminuent encore. Pour ramener le plateau P au potentiel V, il faut lui fournir une nouvelle charge supplémentaire.

La capacité du collecteur varie avec la nature du diélectrique interposé entre les armatures du condensateur.

126. CAPACITÉ DES CONDENSATEURS. — Considérons un condensateur formé de deux sphères de rayons r_1 et r_2 peu différents que sépare un isolant de constante diélectrique ϵ (fig. 165).

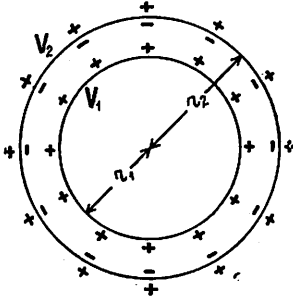


Fig. 165.

La sphère intérieure est au potentiel V_1 ; la sphère extérieure est au potentiel V_2 . Or, nous savons que le potentiel à la surface d'une sphère est donnée par la relation (n° 112)

$$V = \frac{Q}{\epsilon r}$$

Il en résulte que

$$V_1 - V_2 = \frac{Q}{\epsilon r_1} - \frac{Q}{\epsilon r_2}$$

$$V_1 - V_2 = \frac{Q}{\epsilon} \left(\frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right)$$

Or, nous savons que (n° 113)

$$Q = C (V_1 - V_2).$$

Il s'ensuit que

$$C = \epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}$$

Puisque r_1 est très voisin de r_2 , nous obtenons successivement

$$C = \epsilon \frac{r^2}{d}, \quad C = \epsilon \frac{4\pi r^2}{4\pi d}, \quad C = \epsilon \frac{S}{4\pi d}, \quad (1)$$

S et d désignant respectivement la surface de la sphère intérieure et l'épaisseur du diélectrique séparant les deux sphères.

Cette relation est applicable à une fraction du condensateur sphérique: la surface S n'est dans ce cas qu'une fraction de la surface de la sphère. Elle est aussi applicable à un condensateur plan, fraction d'un condensateur sphérique de très grand rayon de courbure.

La capacité d'un condensateur est proportionnelle à la surface du collecteur et inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique; elle dépend en outre de la constante diélectrique du milieu séparant les deux armatures.

La relation (1) donne la capacité du condensateur en unités électrostatiques de capacité si les facteurs S et d sont exprimés en unités CGS (cm^2 et cm). La capacité d'un condensateur, exprimée en farads, est donc :

$$C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{S}{4\pi d}$$

127. TYPES DE CONDENSATEURS. — 1^o) **Condensateur plan.** — Le condensateur plan est constitué d'une lame de verre dont les faces sont recouvertes par des feuilles d'étain.

On construit des condensateurs en enroulant en spirale deux feuilles d'étain séparées par des feuilles de papier paraffiné. Chacune

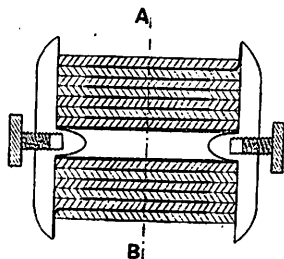


Fig. 166.

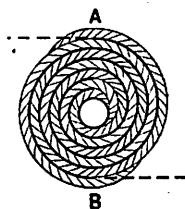


Fig. 167.

des deux armatures est reliée à une borne. Les deux bornes servent à établir les contacts nécessaires. La figure 166 représente une coupe axiale du condensateur, la figure 167 une coupe transversale. Ces condensateurs sont utilisés en T. S. F.

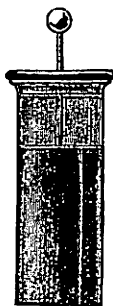


Fig. 168.

2^o) **Bouteille de Leyde.** — La bouteille de Leyde consiste en un flacon en verre recouvert extérieurement d'une feuille métallique (fig. 170). Le flacon contient des feuilles froissées de clinquant dans lesquelles plonge une tige de laiton recourbée et terminée extérieurement par un bouton. Le bouchon et la partie supérieure du flacon sont vernis à la gomme laque.

Les jarres sont des condensateurs dont les armatures sont constituées par des feuilles d'étain collées sur les faces d'un bocal (fig. 168).

3^o) **Condensateurs variables.** — Les condensateurs à capacité variable sont formés d'un groupe fixe de lames métalliques parallèles reliées entre elles et alternant avec des lames métalliques identiques constituant un groupe mobile (fig. 169). La capacité est maximum lorsque les lames se recouvrent complètement; la capacité est minimum lorsque les lames sont complètement dégagées. La capacité du condensateur peut varier entre ces deux valeurs extrêmes par rotation du groupe mobile. Ces condensateurs à capacité variable sont très employés en T. S. F.

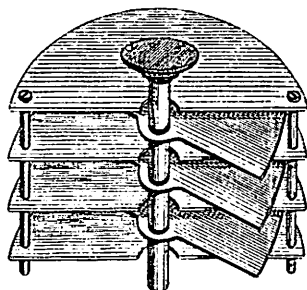


Fig. 169.

128. CHARGE D'UN CONDENSATEUR. — Pour charger un condensateur, on met le collecteur en communication avec une source électrique, le condensateur étant mis au sol.

Si la source électrique est à un potentiel V exprimé en volts, la charge du condensateur exprimée en coulombs est donnée par la relation (n° 113) :

$$Q = CV; \quad Q = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{SV}{4\pi d}$$

129. DÉCHARGE D'UN CONDENSATEUR. — Nous déchargeons brusquement un condensateur en mettant en contact le collecteur et le condensateur par un arc métallique, appelé excitateur, que nous tenons par les manches en verre (fig. 170). Avant le contact, il se produit une forte étincelle.

La décharge pratiquée à l'aide de l'excitateur n'est complète que dans le cas d'un condensateur à diélectrique gazeux. Si, quelques instants après avoir obtenu l'étincelle, nous réunis-

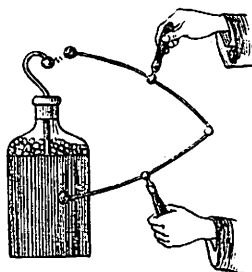


Fig. 170.



Fig. 171.

sons à nouveau les armatures d'une bouteille de Leyde, nous obtenons une seconde étincelle plus faible que la première, puis une troisième et ainsi de suite. Nous appellerons décharges résiduelles les décharges successives qui se produisent après la décharge principale. Nous admettrons avec Franklin que la majeure partie de la charge électrique a pénétré dans l'isolant : en effet, après avoir chargé une bouteille de

Leyde démontable (fig. 171), posons-la sur un bloc de paraffine et séparons les pièces que nous déchargeons ensuite par contact avec la main; remontons la bouteille, réunissons les armatures à l'aide de l'excitateur : nous observons la production d'une forte étincelle.

L'énergie du condensateur, lors de la décharge, peut se manifester sous diverses formes : calorifique (inflammation de l'éther), lumineuse (étincelle), mécanique (perforation d'une carte de visite) (fig. 172), chimique (synthèse eudiométrique de l'eau), physiologique (contraction musculaire).

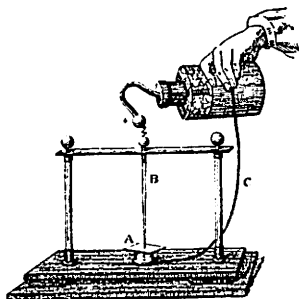


Fig. 172.

***130. ÉNERGIE POTENTIELLE D'UN CONDENSATEUR.**

— L'énergie potentielle, exprimée en joules, d'un condensateur vaut, la différence de potentiel étant exprimée en volts (n^{os} 119 et 126) :

$$T = \frac{1}{2} QV; \quad T = \frac{\epsilon}{18 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{SV^2}{4\pi d}$$

131. ASSOCIATION DES CONDENSATEURS. — 1^o **Association en parallèle.** — Dans l'association en parallèle, les armatures internes des condensateurs sont réunies entre elles. Il en est de même des armatures externes (fig. 173). Les armatures internes sont reliées à la source électrique ; les armatures externes sont mises au sol.

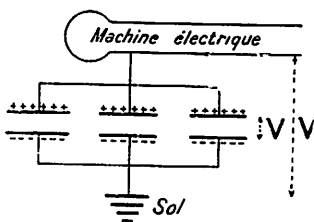


Fig. 173.

Désignons respectivement par $c_1, c_2, c_3 \dots$ les capacités des condensateurs associés, par V le potentiel de la machine électrique et par $q_1, q_2, q_3 \dots$ les charges des condensateurs associés. La charge totale Q des

condensateurs associés vaut

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 \dots$$

ou

$$Q = c_1V + c_2V + c_3V \dots \quad (1)$$

Si nous désignons par C la capacité du condensateur unique équivalent à l'association, il vient

$$Q = CV. \quad (2)$$

En égalant les relations (1) et (2), nous obtenons

$$C = c_1 + c_2 + c_3 \dots; \quad C = \Sigma c.$$

La capacité d'une association en parallèle de condensateurs est égale à la somme des capacités des condensateurs associés.

2^o **Association en série.** — Dans l'association en série, l'armature interne du premier condensateur est reliée à la source électrique; l'armature externe du premier condensateur est reliée à l'armature interne du second condensateur; l'armature externe du second condensateur est reliée à l'armature interne du troisième condensateur et ainsi de suite; l'armature externe du dernier condensateur est mise au sol (fig. 174).

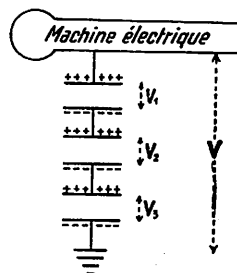


Fig. 174.

Désignons par $c_1, c_2, c_3 \dots$ les capacités des condensateurs associés,

par V le potentiel de la machine électrique et par $q_1, q_2, q_3 \dots$ les charges des condensateurs associés. La différence de potentiel V existant entre les armatures extrêmes des condensateurs associés se répartit entre les différents condensateurs de manière telle que

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \dots \quad (1)$$

L'armature interne du premier condensateur reçoit de la machine une charge $+ Q$. Cette charge induit des charges $- Q$ sur les armatures externes des condensateurs associés, des charges $+ Q$ sur les armatures internes. Les charges Q des condensateurs sont donc les mêmes

$$Q = c_1 V_1; \quad Q = c_2 V_2; \quad Q = c_3 V_3 \dots \quad (2)$$

Si nous désignons par C la capacité du condensateur unique équivalent à l'association, il vient

$$Q = CV \quad (3)$$

puisque la charge Q est identique.

En substituant dans la relation (1) la valeur de V tirée de la relation (3) et les valeurs $V_1, V_2, V_3 \dots$ tirées des relations (2) et en divisant par Q , il vient

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} \dots; \quad \frac{1}{C} = \Sigma \frac{1}{c}$$

L'inverse de la capacité d'une association en série de condensateurs est égale à la somme des inverses des capacités des condensateurs associés.

132. ÉLECTROMÈTRE CONDENSATEUR. — L'électromètre décrit au n° 98 ne permet que la mesure des potentiels supérieurs à 50 volts. Pour la mesure des potentiels compris entre 1 volt et 50 volts, on fait appel à l'électromètre condensateur. Cet appareil est composé d'un électromètre à feuilles d'or associé à un condensateur formé de deux plateaux conducteurs séparés par une lame isolante (fig. 175 et 176). Le plateau inférieur qui joue le rôle de collecteur est réuni à la source dont on désire mesurer le potentiel; le plateau supérieur qui joue le rôle de condenseur est mis au sol. La charge Q portée par le collecteur vaut, v désignant le potentiel de la source et C la capacité du condensateur,

$$Q = Cv.$$

Le potentiel de la source étant faible, les feuilles ne divergent pas. On coupe alors la communication avec le sol, puis avec la source et on éloigne le condenseur en l'enlevant par son manche isolant. La charge Q du collecteur n'a pas varié, mais sa capacité a diminué : donc, son potentiel a augmenté et a pris une valeur telle que

$$Q = cV$$

c désignant la capacité du collecteur seul. Le potentiel acquis par l'électromètre peut être assez élevé pour provoquer l'écartement des

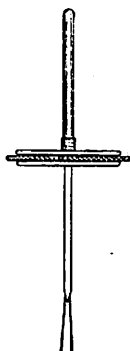


Fig. 175.

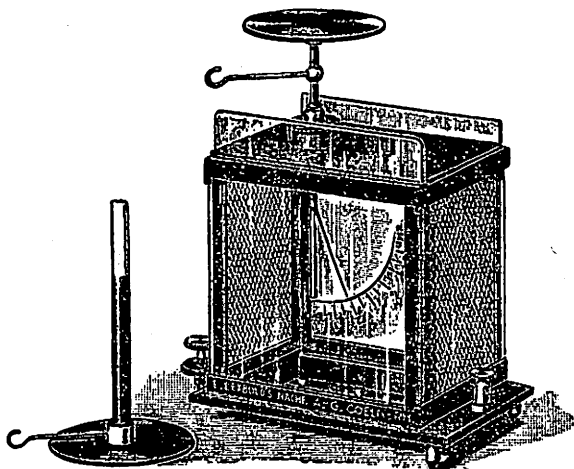


Fig. 176.

feuilles et pour permettre de mesurer le potentiel de la source qui vaut

$$v = \frac{c}{C} V.$$

Pour la mesure des potentiels inférieurs à un volt, on utilise un appareil plus sensible que l'électromètre condensateur : l'électromètre de Kelvin.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer : a) la capacité d'une bouteille de Leyde de 12 cm de diamètre dont les armatures ont une hauteur de 15 cm et dont l'isolant (verre) a une épaisseur de 0,3 cm ; b) la charge électrique fournie à ce condensateur si le potentiel est de 20 000 V ; c) l'énergie potentielle accumulée dans ce condensateur. La constante diélectrique du verre est 8.

SOLUTION. — a) La capacité de la bouteille est :

$$C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{S}{4\pi d} ; C = \frac{\epsilon}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\pi R^2 + 2\pi R h}{4\pi d} ; C = \frac{8}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{6^2 + 2 \cdot 6 \cdot 15}{4 \cdot 0,3} = 16 \cdot 10^{-10} \text{ F ou } 0,0016 \mu\text{F}.$$

b) La charge électrique fournie au condensateur vaut :

$$Q = CV ; Q = 16 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^4 = 32 \cdot 10^{-6} \text{ C ou } 32 \mu\text{C}.$$

c) L'énergie potentielle accumulée dans le condensateur vaut :

$$T = \frac{1}{2} CV^2 ; T = \frac{1}{2} \cdot 16 \cdot 10^{-10} \cdot (2 \cdot 10^4)^2 = 0,32 \text{ J}.$$

2. On groupe en parallèle 10 jarres de 10 cm de diamètre dont les armatures ont une hauteur de 20 cm et dont le diélectrique (verre) a une épaisseur de 0,4 cm. Sachant que la constante diélectrique du verre est 8, déterminer : a) la capacité totale de l'association ; b) la charge communiquée à l'association, le potentiel étant de 30 000 V ; c) le potentiel acquis par chacune des jarres.

SOLUTION. — a) Capacité d'une jarre : $125 \cdot 10^{-5} \mu\text{F}$.
 Capacité de l'association : $C = nc$; $C = 125 \cdot 10^{-4} \mu\text{F}$.
 b) Charge fournie à l'association : $Q = CV$; $Q = 125 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^4 = 375 \cdot 10^{-6} \text{ C}$.
 c) Potentiel acquis par chaque jarre : $30\,000 \text{ V}$.

3. Même énoncé que le 2, les jarres étant associées en série.

SOLUTION. — a) Capacité d'une jarre : $125 \cdot 10^{-5} \mu\text{F}$.
 Capacité de l'association : $C = c/n$; $C = 125 \cdot 10^{-6} \mu\text{F}$.
 b) Charge fournie à l'association : $Q = CV$; $Q = 125 \cdot 10^{-12} \cdot 3 \cdot 10^4 = 375 \cdot 10^{-8} \text{ C}$.
 c) Potentiel acquis par chaque jarre : $v = \frac{V}{n}$; $v = \frac{30\,000}{10} = 3\,000 \text{ V}$.

§ 8. MACHINES ÉLECTROSTATIQUES.

133. ÉLECTROPHORE. — L'électrophore se compose d'un gâteau de résine disposé dans un moule métallique et d'un disque métallique muni d'un manche isolant (fig. 177). Frottons énergiquement le gâteau de résine avec une peau de chat bien sèche : le gâteau de résine s'électrise négativement. Posons sur le gâteau de résine le disque métallique : le disque s'électrise par influence, positivement sur la face inférieure, négativement sur la face supérieure. Mettons le disque en communication avec le sol : l'électricité négative disparaît. Rompons la communication avec le sol, soulevons le disque par le manche isolant : le disque est chargé d'électricité positive. Plongeons le disque dans un cylindre de Faraday posé sur un bloc de paraffine et mettons-le en contact avec la paroi intérieure du cylindre : le disque abandonne son électricité. Cette opération peut se renouveler autant de fois que nous le voulons, le gâteau de résine conservant intégralement sa charge négative.

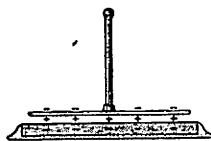


Fig. 177.

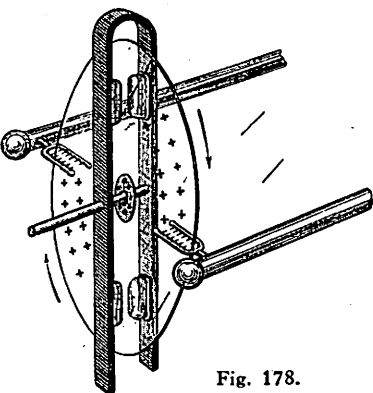


Fig. 178.

L'électrophore et le cylindre de Faraday constituent la machine électrostatique la plus simple.

134. MACHINE DE RAMSDEN. — La machine de Ramsden est constituée d'un plateau vertical en verre, mobile autour d'un axe de rotation passant par son centre (fig. 178). Les deux supports de cet axe portent deux paires de frottoirs constitués par des coussins en soie rembourrés. Ces frottoirs sont en communication avec le sol. Deux grosses tiges en laiton, montées sur pieds de verre,

présentent chacune un peigne (fer à cheval métallique garni de

dents) qui embrasse le plateau sans le toucher. Lors de la rotation, le plateau en verre s'électrise positivement et les frottoirs négativement. L'électricité négative des frottoirs se perd dans le sol. L'électricité positive du plateau, lors de son passage entre les peignes, influence les peignes : elle attire dans les pointes l'électricité négative et elle refoule l'électricité positive qui s'accumule dans les tiges en laiton. Grâce au pouvoir des pointes (n° 101), l'électricité négative des peignes s'écoule sur le plateau qui est ainsi ramené à l'état neutre.

135. MACHINE DE WIMSHURST. — Description (fig. 179).
La machine de Wimshurst est constituée de deux disques en ébonite de même diamètre tournant en sens inverse. Ces disques portent

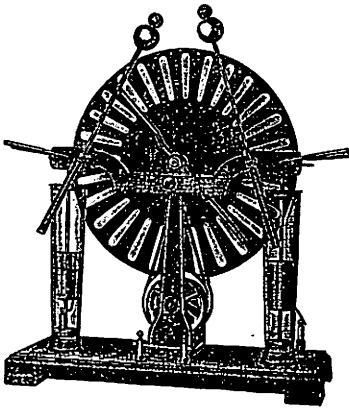


Fig. 179.

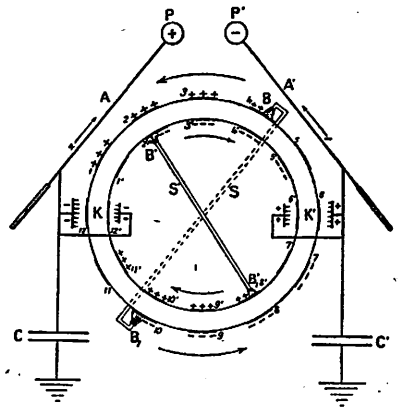


Fig. 180.

sur leur face externe des secteurs d'étain isolés. Nous représenterons les disques d'ébonite par deux circonférences concentriques et nous schématiserons les secteurs d'étain par des traits renforcés (fig. 180). Une tige métallique isolée S (S'), qui porte à ses extrémités des brosses métalliques B et B₁ (B' et B'₁) s'appliquant sur les disques mobiles, fait face à chaque disque. Ces tiges métalliques, qui sont inclinées sur l'horizontale, font entre elles un angle de 60° à 90°. Deux peignes métalliques K et K' embrassent, sans contact, les deux disques et communiquent par des conducteurs isolés A et A' avec les électrodes P et P' de la machine. Les conducteurs A et A', manœuvrés par des manches d'ébonite, peuvent être mis en relation avec des condensateurs C et C'.

Fonctionnement. — Supposons, pour fixer les idées, que les secteurs 1, 2, 3, 4, ... après avoir passé sous le balai B soient électrisés positivement (fig. 180). L'électricité du secteur 2, en passant devant

le balai B' , induit sur le secteur $2'$ de l'électricité négative et sur le secteur $8'$ de l'électricité positive puisque les secteurs $2'$ et $8'$ sont en contact par l'intermédiaire de la tige S' et des balais B' et B'_1 . L'électricité du secteur 1, en passant devant le balai B' , a induit sur le secteur $3'$ de l'électricité négative et sur le secteur $9'$ de l'électricité positive. De même, l'électricité des secteurs $5'$, $4'$,..., en passant devant le balai B , induit sur les secteurs 3, 4,... de l'électricité positive et sur les secteurs 9, 10,... de l'électricité négative. Chacun des plateaux porte donc deux séries de secteurs : les uns chargés positivement, les autres chargés négativement.

L'électricité positive des secteurs 1, 2, 3, 4 et $11'$, $10'$, $9'$, $8'$, en passant devant le peigne K , attire dans les pointes l'électricité négative (qui neutralise les secteurs) et refoule l'électricité positive dans l'électrode P . L'électricité négative des secteurs 7, 8, 9, 10 et $5'$, $4'$, $3'$, $2'$, en passant devant le peigne K' , attire dans les pointes l'électricité positive (qui neutralise les charges des secteurs) et refoule l'électricité négative dans l'électrode P' . L'électricité s'accumule sur les électrodes jusqu'à ce qu'éclate l'étincelle. Les condensateurs C et C' , mis en communication avec les électrodes, ont pour effet de raréfier les étincelles mais de leur donner plus de puissance.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Une balle de sureau de masse 30 mg et de charge 10 *ues* est repoussée avec une force égale à son poids lorsqu'elle se trouve dans l'air à 10 cm au-dessus d'une petite sphère électrisée. Quelle est la charge de la sphère en *ues* et en C ($g = 1\,000\text{ cm/s}^2$)?
R : 300 *ues*; 0,1 μC .

2. Dans un plan sont tracés deux axes de coordonnées rectangulaires. On place deux charges électriques égales mais de signes contraires aux coordonnées : $x = 4$, $y = 0$ et $x = -4$, $y = 0$. Tracer les lignes de force du champ électrique.
Même question si les deux charges électriques sont de même signe. Chercher les coordonnées du point où le champ est nul.

3. Un pendule électrique porte une balle de sureau dont le poids est 5 mg' et dont la charge électrique est 20 *ues*. Placée dans un champ électrique horizontal, la balle dévie d'un angle de 15° . Quelle est la valeur du champ électrique ($g = 1\,000\text{ cm/s}^2$)?
R : 0,064 *ues*.

4. Une petite sphère de 2 cm de rayon disposée dans l'air porte une charge de 1 μC . Déterminez en *ues* et en unités pratiques : a) le potentiel à 10 cm du centre du conducteur, b) le potentiel à 3 cm du conducteur, c) le potentiel à la surface du conducteur, d) la capacité du conducteur, e) l'énergie potentielle du conducteur, f) le champ à 10 cm du centre de la sphère. — R = a) 300 *ues* ou 90 000 V, b) 1000 *ues* ou 300 000 V, c) 1500 *ues* ou 450 000 V, d) 2 *ues* ou $\frac{2}{9} \cdot 10^{-11} F$, e) $2,25 \cdot 10^6\text{ ergs}$ ou 0,225 J, f) 30 *ues*.

5. Deux conducteurs isolés ont des capacités de 2 μF et 6 μF . a) A quel potentiel doit-on amener le premier, pour que, mis en contact du second, non chargé, le potentiel de l'ensemble soit de 10 000 V? b) Quelle est l'énergie potentielle du système avant contact et après contact? R : a) 40 000 V; b) 1 600 J; 800 J.

6. Un condensateur est formé de grands plateaux parallèles de 50 cm sur 62,8 cm, séparés par une lame de verre ($\epsilon = 8$) de 2 mm d'épaisseur. On charge le condensateur à 9 000 V. On demande : a) la charge électrique du condensateur; b) l'énergie potentielle du condensateur; c) le champ électrique entre les armatures; d) le potentiel d'équilibre si on relie l'armature chargée par un conducteur fin à un électroscope de 10 μ es de capacité. R : a) 100 μ C; b) 0,45 J; c) 150 μ es; d) 8 991 V.

7. Un condensateur à lame d'air est formé de deux plateaux de 0,942 m² de surface. Le condensateur qui est mobile est relié au sol. Lorsque la lame d'air a une épaisseur de 3 cm, on charge le collecteur à 3 000 V. a) Quelle est la charge prise par le collecteur? b) Quelle est l'énergie potentielle du condensateur? c) Déterminer les valeurs du potentiel et de l'énergie potentielle du condensateur si on amène le condensateur à 1,5 cm du collecteur. d) Quelle est l'énergie potentielle du condensateur si on amène le condensateur à 1,5 cm du collecteur? e) Quel est le travail nécessaire pour écarter le condensateur du collecteur de 1,5 cm à 15 cm? (Exprimer les réponses en μ es ou C G S) R : a) 250 μ es; b) 1 250 ergs; c) 5 μ es ou 1 500 V; 625 ergs; d) 5 625 ergs.

8. Quatre condensateurs identiques de 0,01 μ F associés en parallèle sont chargés à 60 000 V. 1°) On demande la charge totale de l'association; 2°) On sépare les condensateurs et on les groupe en série. On demande : a) la charge de l'association en série; b) le potentiel de l'association en série; c) la variation d'énergie potentielle de l'ensemble par suite de l'opération. R : 1°) 2 400 μ C; 2°) a) 600 μ C; b) 240 000 V; c) 0.

LECTURE

LA MACHINE A MILLIONS DE... VOLTS

L'atome est constitué

- d'un noyau central, extrêmement dense, extrêmement petit (diamètre : 10^{-13} cm), chargé positivement et
- d'électrons (ils sont au maximum cent) périphériques, extrêmement légers, formant une couronne (diamètre : de 10^{-9} cm à 10^{-8} cm) autour du noyau, chargés négativement (fig. 181).

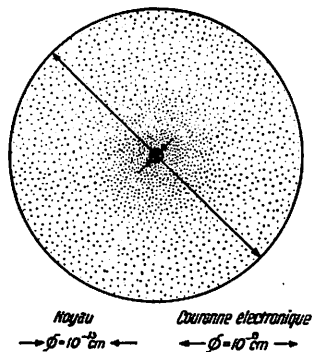


Fig. 181.

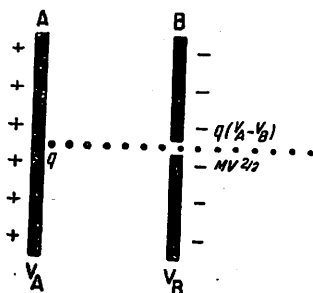


Fig. 182.

L'atome est électriquement neutre car la charge négative des électrons est égale à la charge positive du noyau.

Pour provoquer les réactions chimiques, il suffit de mettre les atomes en contact car les réactions chimiques sont dues à des modifications de la couche externe de la couronne électronique. Pour perturber les couches profondes de la couronne électronique, il faut faire appel à des projectiles (électrons, protons...) animés d'une grande vitesse : l'atome devient le siège d'un rayonnement (rayons lumineux, rayons ultra-violet, rayons X...).

Pour atteindre le noyau, le physicien doit utiliser des projectiles animés d'une vitesse telle qu'ils percent le blindage des électrons : à cet effet, il

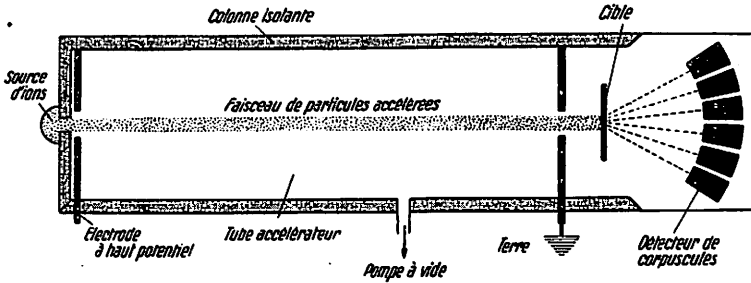


Fig. 183.

construit, depuis quelque trente ans, des machines qui accélèrent les projectiles atomiques afin de leur communiquer l'énergie indispensable pour toucher, voire détruire le noyau. Ces projectiles atomiques sont des particules électrisées (électrons, protons, ions négatifs, ions positifs...) ; s'il est aisé de les produire, il est difficile de leur communiquer la vitesse nécessaire pour atteindre le noyau.

Considérons une particule électrisée produite au voisinage immédiat de l'armature A d'un condensateur chargé (fig. 182). Sous l'action du champ électrique régnant entre les armatures du condensateur, la particule de charge q et de masse m prend, dans le vide, un mouvement uniformément accéléré. Lorsque la particule passe par l'orifice percé dans l'armature B du condensateur, l'énergie cinétique $mv^2/2$ de la particule est égale au travail $q(V_A - V_B)$ des forces électriques

$$\frac{mv^2}{2} = q(V_A - V_B)$$

L'énergie des particules électrisées s'exprime souvent en électron-volts. La charge d'un électron qui franchit une différence de potentiel de un volt acquiert une énergie cinétique de un électron-volt (eV) (1). La charge d'un électron qui fran-

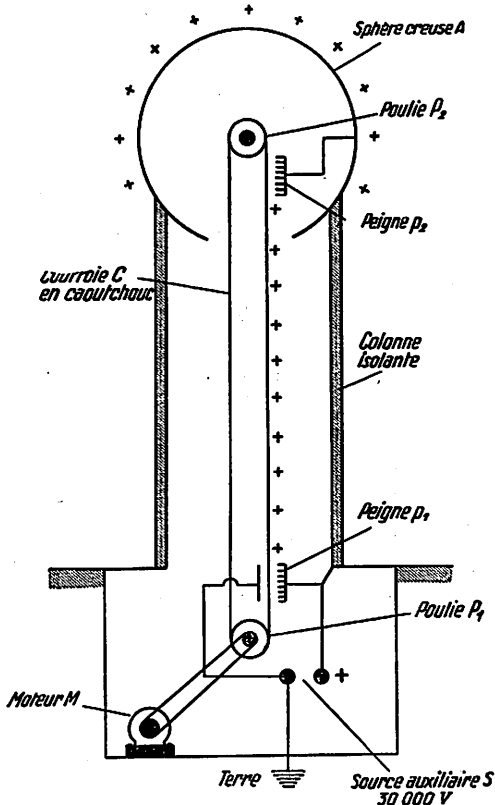


Fig. 184.

(1) Une énergie de un électron-volt équivaut à
 $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} ; 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$

chit une différence de potentiel de un million de volts acquiert une énergie cinétique de un méga-électron-volt (MeV) (1)

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV.}$$

Une énergie de un méga-électron-volt est énorme : un électron porté à la température (10 000 000° K) régnant au centre du Soleil n'aurait qu'une énergie cinétique de translation de 3 000 eV.

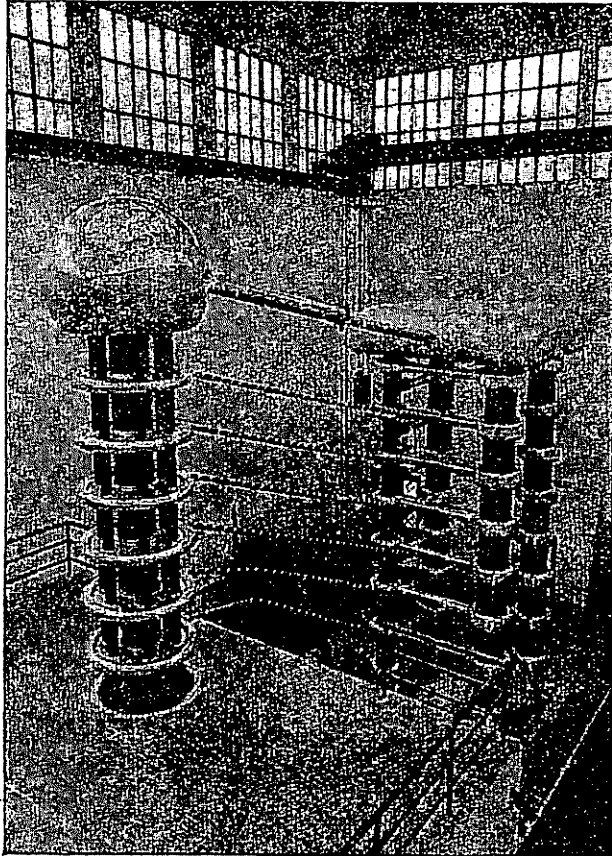


Photo ACEC.

Fig. 185. — Colonne et tube accélérateur à haute tension.
(Ecole Royale Militaire et Faculté Polytechnique de Mons).

On obtient des projectiles doués d'une grande énergie en faisant passer des particules électrisées dans des machines accélératrices, machines généralement d'une grande complexité, d'un maniement délicat, d'un prix élevé (fig. 183). L'une d'entre elles, le générateur à bande de Van de Graaff; est basée sur les lois de l'électrostatique : un conducteur chargé mis en contact interne avec un conducteur creux abandonne à ce dernier toute

(1) Une énergie de un méga-électron-volt équivaut à
 $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

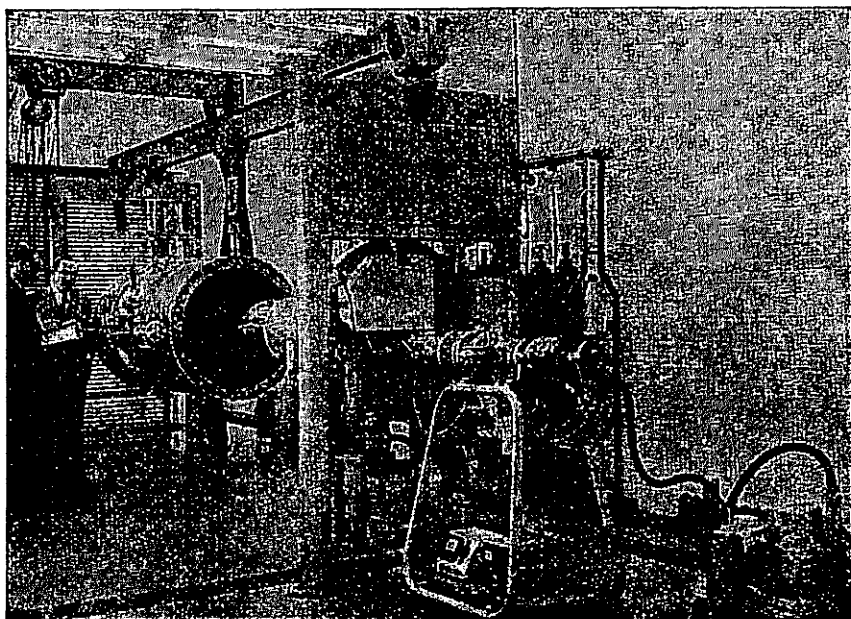


Fig. 186 — Générateur de Van de Graaff
(Université de Liège).

Photo ACEC.

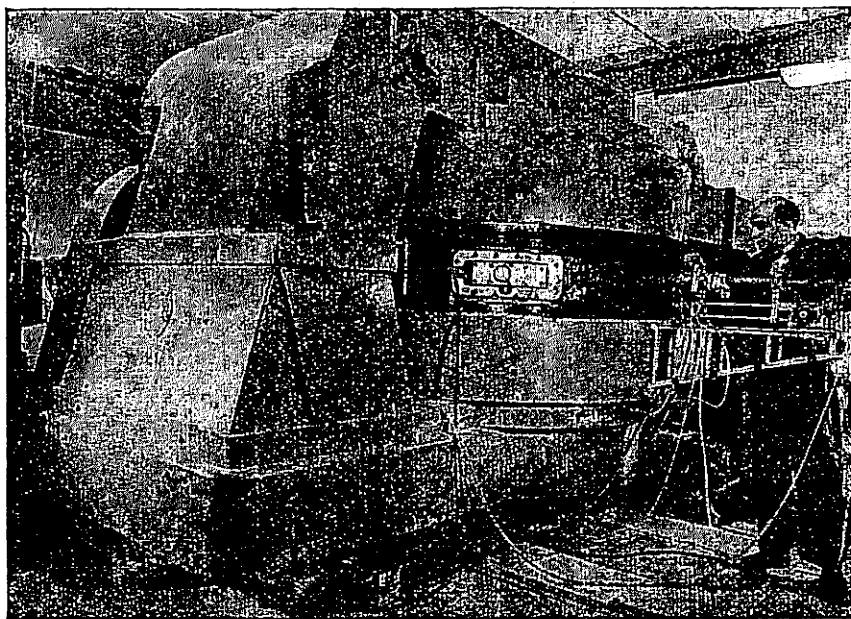


Fig. 187. — Cyclotron.
(Université de Louvain).

Photo ACEC.

sa charge. Un apport continu de charges électriques élève indéfiniment le potentiel du conducteur creux. Toutefois, il arrive que la perte de charge par l'isolant et l'air ambiant est équilibrée par l'apport de charge par la machine : le potentiel limite est atteint.

La figure 184 est le schéma de la machine de Van de Graaff. La courroie en caoutchouc C est entraînée par la poulie P_1 mue par le moteur M : des charges positives se déposent continuellement sur la courroie en caoutchouc C, grâce à l'effet de pointe des dents du peigne p_1 porté à 30 000 volts par la source auxiliaire S. La courroie en caoutchouc C transporte les charges positives à l'intérieur de la sphère creuse A où le peigne p_2 est influencé électrostatiquement : les charges négatives attirées dans les dents du peigne p_2 neutralisent les charges positives de la courroie en caoutchouc C tandis que les charges positives, en nombre égal, passent à la surface du conducteur creux A. La tension entre la sphère creuse et le sol ne cesse de croître : elle peut atteindre de un à deux millions de volts. A une tension plus élevée, des arcs jaillissent entre la sphère et les murs de l'enceinte. Pour atteindre une tension supérieure à deux millions de volts, on place la machine de Van de Graaff dans une cloche contenant de l'air en mélange avec d'autres gaz sous pression : la machine fournit des tensions de cinq à six millions de volts.

La figure 185 est la photographie d'une machine à haute tension (1 400 000 volts) d'un type différent installée au Centre Nucléaire de l'Ecole Royale Militaire et à la Faculté Polytechnique de Mons. La figure 186 est la photographie d'un générateur de Van de Graaff installé à l'Université de Liège. Enfin, la figure 187 est la photographie d'un accélérateur circulaire (cyclotron) installé à l'Université de Louvain.

CHAPITRE II.

ÉLECTRODYNAMIQUE.

L'Electrodynamique étudie le courant électrique, ses causes, ses lois, ses effets.

§ 1. COURANT ÉLECTRIQUE.

136. CONDITIONS DE PRODUCTION D'UN COURANT ÉLECTRIQUE. — L'Electrostatique nous indique les conditions

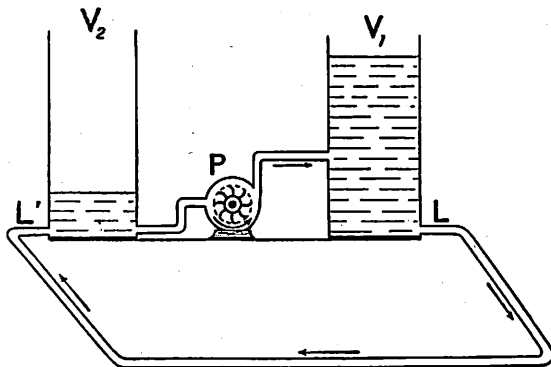


Fig. 188.

nécessaires à la production d'un courant électrique dans un conducteur. Si tous les points du conducteur sont au même potentiel,

l'équilibre électrique est réalisé. Si deux points du conducteur sont à des potentiels différents, les charges électriques se mettent en mouvement et tendent à l'égalisation des potentiels. Un fil métallique reliant les armatures d'un condensateur chargé est le siège d'un courant électrique mais ce courant, qui cesse dès que les armatures du condensateur sont au même potentiel, est **momentané**. Pour produire un courant électrique **permanent** dans le fil, il faut maintenir une différence de potentiel permanente entre les extrémités du fil.

Le phénomène est analogue au courant d'eau qui se produit dans la canalisation LL' reliant les deux réservoirs V_1 et V_2 (fig. 188). Le courant liquide cesse dès que les surfaces libres de l'eau dans les vases sont au même niveau. Pour produire un courant liquide permanent dans la canalisation, il faut maintenir une différence de niveau permanente entre les surfaces libres de l'eau dans les vases.

Pour produire un courant liquide permanent dans la canalisation LL', nous installons une pompe P qui remonte l'eau du vase V_2 au vase V_1 et qui maintient une différence de niveau permanente entre les surfaces libres de l'eau dans les deux vases (fig. 188). La pompe fournit à l'eau qui la traverse de l'énergie potentielle en absorbant elle-même de l'énergie mécanique pour son fonctionnement. De même, pour produire un courant électrique permanent dans un fil métallique, il faut qu'une « pompe électrique » ramène les charges électriques du potentiel inférieur au potentiel supérieur. Ce travail exige de l'énergie que la « pompe électrique » doit emprunter sous une forme quelconque. La « pompe électrique » est un transformateur d'énergie que nous appellerons **générateur d'électricité**.

137. GÉNÉRATEURS D'ÉLECTRICITÉ. — Les générateurs d'électricité généralement les plus employés peuvent être classés en deux catégories :

1^o) Les **piles hydro-électriques** et les **accumulateurs** qui utilisent l'énergie dégagée par une réaction chimique.

2^o) Les **machines magnéto-électriques** et **dynamo-électriques** qui transforment en énergie électrique l'énergie mécanique nécessaire à leur rotation.

Le générateur électrique est relié aux conducteurs extérieurs par deux pièces métalliques qui constituent les **pôles** ou **bornes** du générateur. Ces pôles ne sont pas identiques : le pôle porté au potentiel le plus élevé est appelé pôle **positif**, le pôle porté au potentiel le moins élevé est appelé pôle **négatif**.

Nous étudierons ultérieurement en détail les générateurs d'électricité.

138. EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE.

Expérience. — L'interrupteur K et le gros fil de cuivre f_1 relient, par l'intermédiaire du fil métallique mince R recouvert de paraffine, l'une des bornes du voltamètre T

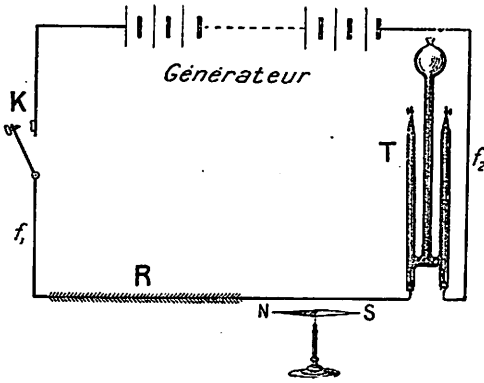


Fig. 189.

au pôle positif du générateur composé de plusieurs accumulateurs (fig. 189). Le gros fil de cuivre f_2 permet de relier l'autre borne du voltamètre T au pôle négatif du générateur. Le voltamètre est constitué d'un long tube en U dont chaque branche est terminée par un robinet. Deux fils de platine, aboutissant à la partie inférieure de chacune de ces branches, constituent les bornes du voltamètre. L'appareil est rempli d'une solution aqueuse d'acide sulfurique qui a été introduite par le tube à entonnoir communiquant avec le tube en U. Une aiguille aimantée NS, mobile sur un pivot vertical, est disposée sous le fil métallique R qui est orienté dans la direction Nord-Sud : fil métallique et aiguille aimantée sont parallèles entre eux.

Tant que l'interrupteur K est ouvert, le circuit est dit **ouvert** ; le courant électrique ne passe pas dans le circuit (fig. 189). Nous n'observons aucun phénomène dans le circuit.

Dès que l'interrupteur est fermé, le circuit est dit **fermé** : le courant électrique passe par les conducteurs métalliques et l'eau acidulée (fig. 190). Nous observons : 1° la fusion de la paraffine, due à l'échauffement du fil métallique R ; 2° une déviation de l'aiguille aimantée NS qui tend à se mettre en croix avec le fil R ; 3° un dégagement gazeux aux bornes en platine du voltamètre ; les gaz produits s'accumulent dans les branches du tube en U et nous caractérisons dans l'une l'hydrogène, dans l'autre l'oxygène.

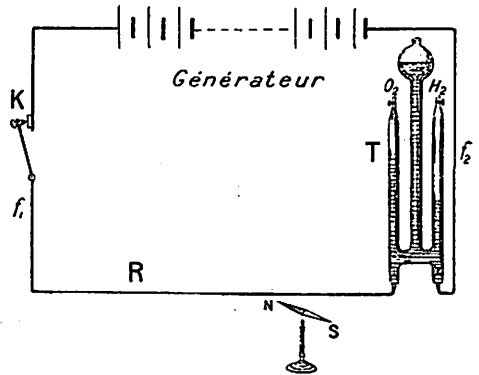


Fig. 190.

Ouvrons l'interrupteur K, le courant électrique est interrompu. Nous observons que l'échauffement du fil métallique R, la déviation de l'aiguille aimantée NS, le dégagement gazeux dans le voltamètre T cessent immédiatement.

Conclusion. — Le courant électrique a des effets calorifiques, des effets magnétiques, des effets chimiques.

139. SENS CONVENTIONNEL DU COURANT ÉLECTRIQUE.

Expérience. — Sans rien changer au circuit, permutons les connexions avec le générateur en reliant le fil f_2 au pôle positif et le fil f_1 au pôle négatif (fig. 191). L'échauffement du fil R se produit à nouveau, l'aiguille aimantée NS dévie en sens inverse du sens de la déviation dans l'expérience précédente, les dégagements d'hydrogène et d'oxygène sont également inversés.

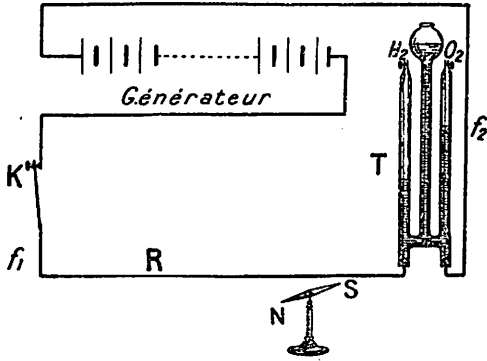


Fig. 191.

Conclusion. — L'inversion qui se produit dans les phénomènes magnétiques et chimiques prouve que le courant électrique a un sens. Nous appellerons **conventionnellement**, comme l'a fait Ampère (physicien français : 1775-1836), **sens du courant** le sens qui, le long du circuit extérieur, va **du pôle positif au pôle négatif** du générateur.

Interprétation électronique. — Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux extrémités d'un conducteur métallique, ce conducteur est le siège d'un champ électrique. Sous l'action de ce champ, les électrons libres, très mobiles et pratiquement impondérables, prennent un mouvement d'ensemble dans la masse du conducteur et se dirigent vers la borne positive. Les ions positifs ne se déplacent pas car le passage du courant dans un conducteur métallique ne s'accompagne d'aucune migration de matière.

Le courant électrique dans un conducteur métallique est donc constitué d'un flux d'électrons qui se dirigent vers la borne positive. Le sens du courant est donc, en réalité, inverse du sens conventionnel. Dans le cas d'un circuit fermé, le générateur ramène continuellement les mêmes électrons à circuler dans le conducteur.

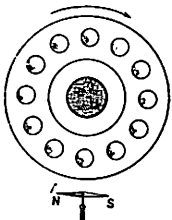


Fig. 192.

L'expérience de Rowland prouve qu'une charge électrique en mouvement produit le même effet magnétique qu'un courant. Un disque isolant porte plusieurs petites sphères métalliques (fig. 192). Quand les sphères ne sont pas électrisées, la rotation du disque n'exerce aucune action sur l'aiguille aimantée. Quand les sphères sont électrisées, la rotation du disque fait dévier l'aiguille aimantée comme le fait un courant.

Le courant électrique peut donc être considéré comme formé de charges électriques en mouvement.

140. INTENSITÉ D'UN COURANT ÉLECTRIQUE. — Nous caractérisons un courant d'eau par son débit c'est-à-dire par la quantité d'eau qui s'écoule en l'unité de temps. De même, nous caractérisons le courant électrique qui circule dans un conducteur par son intensité c'est-à-dire par la quantité d'électricité qui passe par seconde dans le conducteur.

Si Q désigne la quantité d'électricité écoulée pendant le temps t , l'intensité I du courant, que nous supposons constante pendant le temps t , est définie par la relation :

$$I = \frac{Q}{t}$$

Dans un circuit fermé, nous n'observons en aucun point du circuit une accumulation d'électricité (1). L'intensité du courant est donc la même dans toutes les parties d'un circuit simple.

Puisque le courant est constitué d'un flux d'électrons, son débit c'est-à-dire son intensité est le produit de la charge e d'un électron par le nombre n d'électrons écoulés par seconde à travers la section du conducteur

$$I = n e.$$

141. UNITÉS D'INTENSITÉ. — La formule $I = Q/t$ permet de fixer les unités d'intensité.

1^o) Unité électrostatique. — L'unité électrostatique d'intensité est l'intensité d'un courant qui débite une unité électrostatique de charge par seconde.

$$1 \text{ u e s d'intensité} = \frac{1 \text{ u e s de charge}}{1 \text{ s}}$$

2^o) Unité pratique. — L'unité électrostatique d'intensité est trop petite; aussi emploie-t-on l'**ampère (A)** du nom d'Ampère (physicien français : 1775-1836) intensité d'un courant qui débite un coulomb par seconde.

$$1 \text{ ampère} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ seconde}}$$

(1) En effet, si l'intensité dans le voltamètre T était inférieure à l'intensité dans le fil R , des charges électriques s'accumuleraient sur ce fil (fig. 190). Il s'y produirait une élévation indéfinie du potentiel, ce qui ne se constate pas.

3^o) **Relation entre l'ampère et l'unité électrostatique.** — En remplaçant dans la relation précédente

1 coulomb par $3 \cdot 10^9$ *ues* de charge, il vient

$$1 \text{ ampère} = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ ues de charge}}{1 \text{ seconde}} = 3 \cdot 10^9 \text{ ues d'intensité}$$

L'ampère est donc $3 \cdot 10^9$ plus grand que l'unité électrostatique d'intensité.

Pour fixer les idées, disons que l'intensité du courant qui parcourt les fils téléphoniques est de l'ordre du millième d'ampère; que l'intensité du courant qui traverse une lampe ordinaire est de quelques dixièmes d'ampère; que l'intensité du courant qui alimente les moteurs peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères.

142. AMPÈREMÈTRES. — Dans le circuit représenté figure 190, diminuons le nombre d'accumulateurs formant le générateur; la différence de potentiel aux bornes du générateur est plus faible.

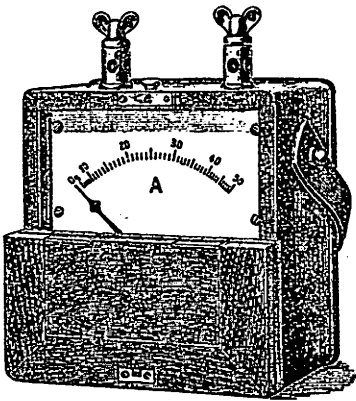


Fig. 193.

L'échauffement du fil métallique, les dégagements gazeux dans le voltamètre sont plus lents et la déviation de l'aiguille aimantée est moins prononcée : le courant est moins intense. Tous les effets des courants peuvent donc servir à la mesure de leur intensité. Cependant, parmi ces effets, c'est la déviation de l'aiguille qui est le plus aisément mesurable. Les appareils ordinaires de mesure appelés **ampèremètres** comportent une aiguille qui se déplace devant

un cadran gradué (fig. 193), les déplacements de l'aiguille indicatrice étant produits par des effets magnétiques. Nous étudierons ultérieurement la constitution et la graduation de ces appareils. Le **galvanomètre** est un ampèremètre très sensible pouvant détecter le millionième, voire même le milliardième d'ampère.

§ 2. LOIS DES COURANTS.

1. LOI D'OHM.

143. LOI D'OHM.

Analogie hydraulique. — Considérons deux vases V_1 et V_2 , reliés entre eux par une canalisation LL' de faible section (fig. 194). Le tube d'écoulement latéral t permet de maintenir constant le niveau de l'eau dans le vase V_2 . Une ou-

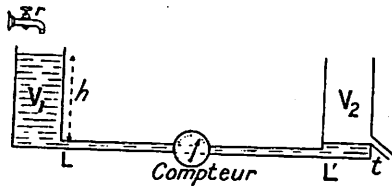


Fig. 194.

verture appropriée du robinet r , relié à la conduite d'eau, permet de maintenir un niveau déterminé d'eau dans le vase V_1 malgré l'écoulement.

La différence de niveau entre les vases V_1 et V_2 produit dans la canalisation LL' un courant d'eau dont le débit est fonction de la **différence de niveau** entre les deux vases V_1 et V_2 .

Expérience. — Relions d'abord les bornes L et L' à un générateur constitué d'un accumulateur, nous déterminons la tension aux bornes U en mesurant, à l'aide d'un électromètre sensible, les potentiels des bornes L et L' et, à l'aide d'un ampèremètre, l'intensité I du courant parcourant le fil. Relions ensuite les bornes L et L' à un générateur constitué de deux accumulateurs, nous déterminons la tension aux bornes U' et l'intensité I' du courant, ... Le rapport U/I entre la tension aux bornes et l'intensité du courant correspondante est constant pour un fil déterminé.

Conclusion. — L'expérience, suggérée par l'analogie hydraulique, conduit à la loi suivante connue sous le nom de loi d'Ohm (physicien allemand : 1787-1854) :

Considérons deux bornes métalliques L et L' reliées entre elles par un fil métallique (fig. 195). Les bornes métalliques L et L' sont reliées respectivement au pôle positif et au pôle négatif d'un générateur (batterie d'accumulateurs). Nous pouvons,

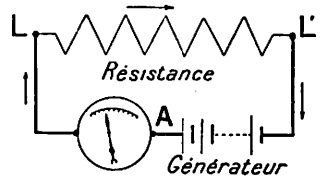


Fig. 195.

en changeant le nombre d'éléments de la batterie, faire varier la différence de potentiel ou tension entre les extrémités L et L' du fil.

La différence de potentiel U ($U = V - V'$) entre les bornes L et L' produit dans le fil LL' un courant électrique dont l'intensité est fonction de la **différence de potentiel** ou tension entre les deux bornes L et L' .

L'intensité du courant électrique qui traverse un conducteur est directement proportionnelle à la différence de potentiel appliquée aux extrémités de ce conducteur.

$$\frac{U}{I} = R$$

144. RÉSISTANCE. — Que signifie le rapport R constant pour un conducteur déterminé? La même tension ne produit pas la même intensité de courant dans tout conducteur : pour une tension déterminée, l'intensité du courant est d'autant plus faible que le coefficient R est plus grand. Le coefficient R , qui caractérise un conducteur, nous apparaît donc comme la résistance qu'oppose le conducteur au passage du courant. D'une manière analogue, le débit dans une canalisation d'eau est, pour une différence de niveau déterminée, d'autant plus faible que la canalisation offre plus de difficulté, plus de résistance au passage de l'eau.

145. UNITÉS DE RÉSISTANCE. — La relation $R = U/I$ permet de fixer les unités de résistance.

1^o) **Unité électrostatique.** — L'unité électrostatique de résistance est la résistance d'un conducteur qui, soumis à une différence de potentiel d'une unité électrostatique, laisse passer un courant d'une unité électrostatique d'intensité.

$$1 \text{ u e s de résistance} = \frac{1 \text{ u e s de différence de potentiel}}{1 \text{ u e s d'intensité}}$$

2^o) **Unité pratique.** — L'unité électrostatique de résistance est trop grande; aussi emploie-t-on l'**ohm** (Ω), résistance d'un conducteur qui, soumis à une différence de potentiel d'un volt, laisse passer un courant d'un ampère.

$$1 \text{ ohm} = \frac{1 \text{ volt}}{1 \text{ ampère}}$$

3^o) **Relation entre l'ohm et l'unité électrostatique.** — En remplaçant dans la relation précédente

$$1 \text{ volt par } \frac{1}{3 \cdot 10^2} \text{ u e s de différence de potentiel et}$$

$$1 \text{ ampère par } 3 \cdot 10^9 \text{ u e s d'intensité, il vient :}$$

$$1 \text{ ohm} = \frac{\frac{1}{3 \cdot 10^2} \text{ u e s de d d p}}{3 \cdot 10^9 \text{ u e s d'int}} = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \text{ u e s de résistance.}$$

L'ohm est donc $9 \cdot 10^{11}$ fois plus petit que l'unité électrostatique de résistance.

L'ohm est pratiquement représenté par la résistance à 0° d'une colonne de mercure ayant 1 mm^2 de section et 106,3 cm de longueur. On trouve dans le commerce des résistances étalonnées multiples ou sous-multiples de l'ohm; ces résistances sont généralement constituées de fil de maillechort ou d'un autre alliage noyé dans la paraffine.

146. VOLTMÈTRE. — Pour mesurer la tension qui règne entre deux points L et L' d'un circuit, on branche sur ces deux points un appareil basé sur le même principe que l'ampèremètre. Cet appareil, qui présente une très grande résistance, est traversé par un courant d'intensité très faible : il ne produit donc aucune modification dans la ligne sur laquelle il est branché. Si i est l'intensité du courant qui traverse l'appareil et si R en est la résistance, la loi d'Ohm nous permet de connaître la tension U régnant entre les deux points L et L' : $U = Ri$. Afin d'éviter les calculs, on inscrit sur l'appareil non pas les valeurs de i mais les valeurs de Ri . L'appareil ainsi gradué constitue un **voltmètre** (fig. 196).

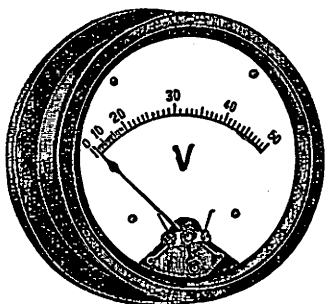


Fig. 196

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Quelle tension faut-il appliquer aux extrémités d'un fil métallique pour qu'il soit parcouru par un courant de 5 A, sachant que ce fil est parcouru par un courant de 2 A lorsque la tension aux bornes est de 6 V ?

SOLUTION. — L'intensité du courant dans un fil conducteur étant directement proportionnelle à la tension qui règne entre ses extrémités, nous avons :

$$\frac{U'}{U} = \frac{I'}{I}$$

En remplaçant chacune des lettres par leurs valeurs respectives, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{x}{6} &= \frac{5}{2} \\ x &= 15 \text{ V.} \end{aligned}$$

2. LOI DE PUILLET.

Rin di la u

147. LOIS DE LA RÉSISTANCE.

Expériences. — Entre les deux bornes L et L' du dispositif expérimental schématisé par la figure 197, nous maintenons constante une différence de

potentiel U . La mesure de l'intensité I du courant électrique nous permet de calculer la valeur de la résistance R du fil intercalé entre les bornes :

$$R = \frac{U}{I}.$$

1°) Réunissons successivement les bornes métalliques L et L' par des fils de même nature, de même section mais de longueurs régulièrement croissantes. Nous mesurons, à l'ampèremètre A , une intensité I pour un fil de longueur l , une intensité $I/2$ pour un fil de longueur $2l$, une intensité $I/3$ pour un fil de longueur $3l$,...

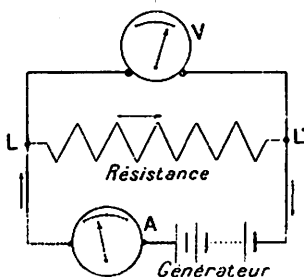


Fig. 197.

2°) En opérant de la même manière avec des fils de même nature, de même longueur mais de sections régulièrement croissantes, nous mesurons à l'ampèremètre une intensité I pour un fil de section s , une intensité $2I$ pour un fil de section $2s$, une intensité $3I$ pour un fil de section $3s$,...

3°) En opérant avec des fils de même longueur, de même section mais de nature différente (cuivre, fer, nichrome,...), nous mesurons à l'ampèremètre des intensités différentes.

Conclusion. — La résistance d'un fil conducteur est directement proportionnelle à sa longueur, inversement proportionnelle à sa section, directement proportionnelle à un coefficient particulier à chaque conducteur que nous appelons résistance spécifique ou résistivité.

Cette loi, qui est connue sous le nom de loi de Pouillet (physicien français : 1791-1868), est résumée dans la relation suivante :

$$R = \rho \frac{l}{s}$$

Interprétation électronique. — Considérons un cylindre de s centimètres carrés de section et de l centimètres de longueur constitué d'un métal renfermant N électrons libres par centimètre cube (fig. 198). Entre les extrémités de ce cylindre, appliquons et maintenons constante une différence de potentiel U . Un cube d'un centimètre de côté, situé dans le cylindre, présente entre les deux faces A et B une différence de potentiel U/l . La force agissant sur l'électron c'est-à-dire la force d'entraînement vaut (n° 110) :

$$F = He; F = \frac{U}{l} \cdot e.$$

Nous comprenons facilement que la vitesse V d'entraînement de l'électron dépend étroitement de la force d'entraînement et lui est

proportionnelle. D'autre part, le nombre n d'électrons qui traversent la face A du cube est égal au nombre d'électrons contenus dans un parallépipède rectangle de 1 centimètre carré de section et de V centimètres de longueur. Nous avons donc

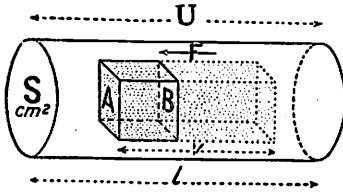


Fig. 198.

$$n = kNV; n = kN \frac{U}{l} e.$$

Le débit électrique c'est-à-dire l'intensité I du courant à travers le cylindre vaut :

$$I = n e s; I = kN \frac{U}{l} e^2 s.$$

Nous concevons que le nombre N d'électrons libres dépend de la nature du métal. Posons $kNe^2 = 1/\rho$, nous obtenons

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{s}} \quad \text{ou} \quad I = \frac{U}{R}.$$

Nous retrouvons les lois d'Ohm et de Pouillet.

148. RÉSISTIVITÉS. — La résistivité d'un conducteur est la résistance exprimée en ohms d'un fil de ce conducteur ayant 1 centimètre de longueur et 1 centimètre carré de section. *elle est exprimée en Ω.cm*

La notion de résistivité peut être généralisée et appliquée aux liquides, aux isolants.

Le tableau suivant donne la résistivité de quelques substances très employées.

Résistivités (à 15°).

Conducteurs	Résistivités en ohm . cm.	Conducteurs	Résistivités en ohm . cm.	Diélectriques	Résistivités en ohm . cm.
Argent	$1,6 \cdot 10^{-6}$	Constantan	$44 \cdot 10^{-6}$	Eau distillée	$0,4 \cdot 10^8$
Cuivre	$1,7 \cdot 10^{-6}$	Invar (1)	$80 \cdot 10^{-6}$	Marbre	$10\,000 \cdot 10^8$
Aluminium	$2,8 \cdot 10^{-6}$	Mercurc	$94 \cdot 10^{-6}$	Bois sec	$10\,000 \cdot 10^8$
Zinc	$5,7 \cdot 10^{-6}$	Nichrome (1)	$100 \cdot 10^{-6}$	Verre	$90 \cdot 10^{12}$
Laiton (1)	$7,0 \cdot 10^{-6}$	Carbone	$6\,000 \cdot 10^{-6}$	Porcelaine	$300 \cdot 10^{12}$
Fer	$9,6 \cdot 10^{-6}$	H ₂ SO ₄ -10 %	2,5	Caoutchouc	$1\,000 \cdot 10^{12}$
Nickel	$12,5 \cdot 10^{-6}$	CuSO ₄ -15 %	23,5	Ebonite	$15\,000 \cdot 10^{12}$
Maillechort (1)	$25,0 \cdot 10^{-6}$	CuSO ₄ -10 %	31,2	Pétrole	$20\,000 \cdot 10^{12}$
Manganine (1)	$44,0 \cdot 10^{-6}$	CuSO ₄ -2,5 %	91,5	Paraffine	$35\,000 \cdot 10^{12}$

(1) Laiton : alliage cuivre (70 %) et zinc (30 %). Maillechort : alliage cuivre (60 %), zinc (20 %) et nickel (20 %). Manganine : alliage cuivre (84 %), manganèse (12 %) et nickel (4 %). Constantan : alliage cuivre (60 %) et nickel (40 %). Invar : acier au nickel (35 %). Nichrome : alliage nickel (60 %), chrome (12 %) et fer (28 %).

$$\rho_{1u} = 7 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}.$$

A) Les résistivités des métaux atteignent à peine une valeur de quelques millièmes d'ohm (microhm). Le cuivre et l'aluminium, de résistivité très faible, sont utilisés pour la fabrication des câbles électriques; les alliages et le carbone, de résistivité relativement élevée, sont utilisés pour la fabrication de résistances.

1) Les résistivités des diélectriques sont énormes : elles s'expriment en mégohms (millions d'ohms) et en mégamégohms (millions de millions d'ohms).

149. ACTION DE LA TEMPÉRATURE SUR LA RÉSISTIVITÉ. — La résistivité des métaux croît avec la température suivant une loi analogue à la loi de dilatation

$$\rho_T = \rho_0 (1 + aT)$$

ρ_T désignant la résistivité du métal à T° ; ρ_0 la résistivité du métal à 0° ; a le coefficient de température. Ce coefficient, qui varie légèrement avec la nature du métal, est souvent voisin de $1/250$.

Les résistivités des métaux varient donc assez rapidement avec la température : la résistance du filament en tungstène d'une lampe à incandescence est dix fois plus élevée à l'incandescence qu'à froid.

Au voisinage du zéro absolu, la résistivité de certains métaux : mercure, plomb, étain, ... ne suit plus la loi indiquée; elle tombe brusquement et tend à s'annuler (fig. 199) : la résistance d'un fil métallique y devient donc pratiquement nulle, sa conductivité devient excessivement grande; c'est le phénomène de **supraconductivité** des métaux.

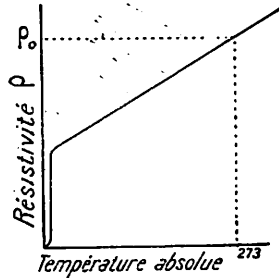


Fig. 199.

La résistivité de certains alliages : maillechort, constantan, ... est pratiquement indépendante de la température; ces alliages sont utilisés pour la fabrication de résistances-étalons.

La résistivité des solutions aqueuses des acides, des bases et des sels diminue quand leur température augmente.

150. RÉSISTANCES EN SÉRIE. — Considérons des conducteurs AB, BC, CD de résistances r_1, r_2, r_3 groupés en série c'est-à-dire

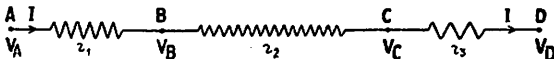


Fig. 200.

disposés à la suite l'un de l'autre (fig. 200). Désignons par I l'intensité du courant parcourant le circuit, par V_A, V_B, V_C, V_D les poten-

tiels aux points A, B, C, D. Par application de la loi d'Ohm à chacun des conducteurs constituant le circuit, nous avons :

$$V_A - V_B = r_1 I; \quad V_B - V_C = r_2 I; \quad V_C - V_D = r_3 I$$

ou

$$V_A - V_D = (r_1 + r_2 + r_3) I. \quad (1)$$

Si nous désignons par R la résistance d'un conducteur unique qui, substitué aux conducteurs de résistances r_1, r_2 et r_3 , ne modifie en rien l'intensité I du courant et les potentiels V_A et V_D aux points A et D, nous avons :

$$V_A - V_D = RI. \quad (2)$$

En égalant les relations (1) et (2), nous obtenons :

$$R = r_1 + r_2 + r_3$$

$$R = \sum r$$

La résistance totale d'un circuit de résistances disposées en série est égale à la somme de ces résistances.

151. RHÉOSTATS. — Les rhéostats sont des appareils qui, introduits dans un circuit, permettent d'en faire varier aisément la résistance.

1°) Rhéostat à plots (fig. 201). Des résistances constituées par des fils en maillechort enroulés en ressort à boudin aboutissent à une série de plots p_0, p_1, p_2, \dots . Une manette conductrice M, mobile autour d'un axe O, peut être mise en contact avec l'un ou l'autre des plots. Le plot p_0 et l'axe O de la manette sont respectivement reliés aux bornes B et B' de l'appareil. Ces bornes permettent l'introduction du rhéostat dans le circuit. Le courant doit traverser les fils compris entre le plot p_0 et le plot en contact avec la manette. Le jeu de la manette permet d'introduire dans le circuit une résistance qui peut varier de la valeur zéro (manette en contact avec le plot p_0) à une valeur maximum (manette en contact avec le plot p_7). Un plot supplémentaire p_m , appelé plot mort, permet d'interrompre le courant.

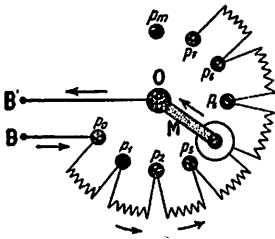


Fig. 201.

de la manette permet d'introduire dans le circuit une résistance qui peut varier de la valeur zéro (manette en contact avec le plot p_0) à une valeur maximum (manette en contact avec le plot p_7). Un plot supplémentaire p_m , appelé plot mort, permet d'interrompre le courant.

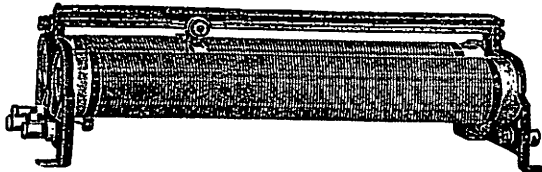


Fig. 202.

2°) Rhéostat à curseur (fig. 202). Il est constitué d'un fil résistant enroulé en spirale. Un curseur qui se déplace le long d'une tige

métallique peut être amené en contact avec l'une des spires. La tige métallique et une des extrémités du fil sont respectivement reliées aux bornes de l'appareil. Le jeu du curseur, en introduisant dans le circuit un nombre variable de spires, fait varier la résistance.

3^o) **Rhéostat à liquide** (fig. 203). Un bac de verre contient une solution de sulfate de cuivre dans laquelle plongent deux plaques de cuivre mobiles reliées au circuit. Le déplacement d'une des plaques de cuivre introduit dans le circuit une épaisseur variable du liquide.

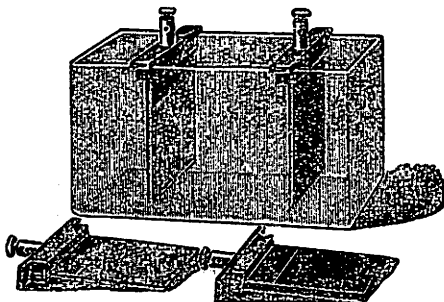


Fig. 203.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer la résistance de la ligne télégraphique Bruxelles-Mons (60 km) sachant que le fil de cuivre (résistivité : $1,57 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) a un diamètre de 2 mm. Calculer la variation de résistance produite par les écarts de température (température maximum : 38° , température minimum : -12°).

SOLUTION. — La relation de Pouillet donne :

$$R = \rho \frac{l}{s}; R = \frac{1,57 \cdot 10^{-6} \cdot 6 \cdot 10^5}{3,14 \cdot 10^{-2}} = 300 \Omega.$$

La variation de résistance vaut :

$$\Delta R = \rho \frac{l}{s} (1 + \alpha T) - \rho \frac{l}{s}; \Delta R = \rho \frac{l}{s} \alpha T; \Delta R = 300 \cdot \frac{1}{250} \cdot 50 = 60 \Omega.$$

2. On veut construire un rhéostat de 50Ω avec un fil de nichrome ($\rho = 100 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) de $0,5 \text{ mm}^2$ de section. a) Combien de spires devra comporter le rhéostat sachant que le diamètre des spires est de 8 cm ? b) Quelle sera l'intensité du courant dans le rhéostat si la tension aux bornes du rhéostat est de 3,5 V quand il y a 70 spires dans le circuit ?

SOLUTION. — a) La longueur du fil de nichrome à employer se déduit de la loi de Pouillet :

$$R = \rho \frac{l}{s}; l = \frac{R s}{\rho}; l = \frac{50 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 10^{-6}} = 2\,500 \text{ cm ou } 25 \text{ m}.$$

$$\text{Nombre de spires : } n = \frac{2\,500}{3,14 \cdot 8} = 99,5 \text{ spires } \neq 100 \text{ spires}.$$

$$\text{b) Résistance des 70 spires : } R = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 70}{5 \cdot 10^{-3}} = 35 \Omega.$$

$$\text{Intensité du courant : } I = \frac{U}{R}; I = \frac{3,5}{35} = 0,1 \text{ A}.$$

3. LOI DE JOULE.

152. ÉNERGIE ET PUISSANCE ÉLECTRIQUES. — L'énergie dégagée par un courant électrique se déduit directement de la relation : $T = Q(V - V')$ (n^o 108) dans laquelle nous substituons à Q la valeur correspondante It (n^o 140) et à la valeur $V - V'$ la tension U . Nous avons donc :

$$T = U I t \quad (1)$$

L'énergie électrique s'exprime en joules si la différence de potentiel est exprimée en volts, l'intensité en ampères et le temps en secondes. Fréquemment, cependant, les électriciens emploient une autre unité d'énergie : le kilowattheure (**kWh**). Le kilowattheure est l'énergie dépensée par un courant électrique d'une puissance de 1000 watts pendant une heure. Donc :

$$1 \text{ kWh} = 1\,000 \cdot 3\,600 = 3\,600\,000 \text{ J.}$$

La puissance du courant électrique c'est-à-dire l'énergie fournie en l'unité de temps vaut :

$$\boxed{W = UI} \quad (2)$$

La puissance électrique s'exprime en watts si la différence de potentiel est exprimée en volts et l'intensité en ampères.

153. LOI DE JOULE.

Raisonnement. — Si, dans un conducteur métallique, il ne se passe rien d'autre qu'un dégagement de chaleur, toute l'énergie électrique est transformée en énergie calorifique. Le principe de la conservation de l'énergie nous permet de calculer la quantité Q de calories dégagées dans le conducteur sachant que 1 joule vaut 0,24 calorie (Tome I, n° 301) :

$$Q = 0,24 UI t \quad (3)$$

Or, la loi d'Ohm appliquée à ce cas nous permet de remplacer U par la valeur correspondante IR ($U = IR$). L'énergie calorifique dégagée par le courant vaut donc :

$$\boxed{Q = 0,24 I^2 R t} \quad (4)$$

Énoncé de la loi de Joule. — La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur est proportionnelle au temps de passage du courant, au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur.

La dissipation sous forme de chaleur de l'énergie électrique d'un courant traversant un conducteur est connue sous le nom d'effet Joule.

Vérification expérimentale de la loi de Joule. — On fait passer pendant un temps t un courant d'intensité I dans un conducteur métallique de résistance R plongeant complètement dans un calorimètre de valeur en eau μ (fig. 204). On relève les températures T_i et T_f du système calorimétrique. On calcule la quantité de chaleur Q gagnée par le système calorimétrique à l'aide de la relation (Tome I, n° 238)

$$Q = (M + \mu) (T_f - T_i)$$

dans laquelle M désigne la masse d'eau contenue dans le calorimètre.

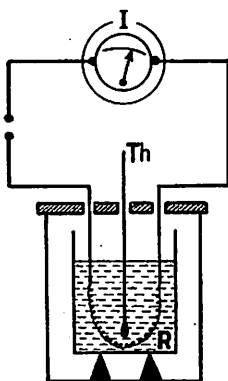


Fig. 204.

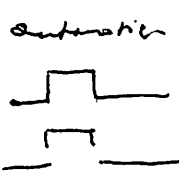
On remarque, en faisant varier systématiquement l'une des trois variables t , I , R que les quantités de chaleur sont proportionnelles au temps de passage du courant, au carré de l'intensité du courant et à la résistance du conducteur.

154. APPLICATIONS DES EFFETS/CALORIFIQUES DU COURANT. — 1^o **Chauffage.** — Le courant porte au rouge un fil peu oxydable (maillachort, nickeline) enroulé sur une substance isolante et réfractaire. Citons les radiateurs électriques, les fers à souder électriques, les fours électriques de laboratoire, les fers à repasser, etc.

2^o **Éclairage.** — Un fil très fin, enfermé dans une ampoule de verre, est porté à l'incandescence par le passage d'un courant d'intensité convenable. Ce fil doit rester solide aux températures de 2000°, 2500°. Anciennement, on employait des filaments de carbone; actuellement, on emploie des filaments en tungstène. L'ampoule est vide d'air ou remplie d'un gaz inerte de manière à éviter la combustion du fil.

Les lampes à incandescence sont de plus en plus remplacées par des tubes fluorescents de surface lumineuse plus grande et de consommation plus faible.

3^o **Coupe-circuit.** — La chaleur dégagée dans les conducteurs pouvant en élever la température à une valeur dangereuse, l'intensité du courant qui parcourt un conducteur ne doit pas dépasser la valeur limite assignée par les caractéristiques du conducteur : pour un fil de cuivre recouvert d'une gaine isolante, l'intensité ne peut dépasser deux ou trois ampères par millimètre carré. Pour éviter un échauffement anormal des canalisations à la suite d'une augmentation accidentelle de l'intensité, on dispose, dans le circuit, des coupe-circuits constitués d'un fil de plomb de deux ou trois centimètres de longueur et de section appropriée. Si l'intensité du courant dépasse la valeur limite, le fil de plomb est porté à sa température de fusion : la fusion du plomb interrompt le courant.



4^o **Arc électrique.** — Si, après avoir mis en contact les pointes de deux tiges de charbon reliées aux pôles d'un puissant générateur, nous les séparons, une flamme jaillit entre elles et constitue l'arc électrique (fig. 205). Observons que la tige reliée au pôle positif du générateur se creuse en cratère. Ce cratère, où la température atteint 3500°, constitue une source lumineuse intense. Les arcs électriques sont actuellement remplacés par des lampes à incandescence très puissantes.

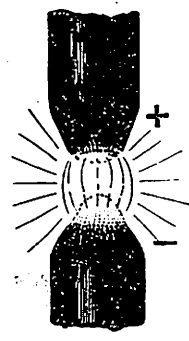
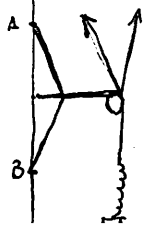


Fig. 205.

amplitude électrique



EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Une lampe électrique fonctionne normalement sous une tension de 110 V avec un courant de 0,25 A. Quel est le prix de l'énergie électrique consommée par la lampe après 40 heures de fonctionnement sachant que le kilowattheure se paie 3,20 f?

SOLUTION. — Puissance du courant dans la lampe: $W = UI$; $W = 110 \cdot 0,25 = 27,5$ W ou 0,0275 kW.

Energie électrique consommée : $T = UIt$; $T = 0,0275 \cdot 40 = 1,10$ kWh.

Prix de l'énergie consommée : $3,20 \cdot 1,1 = 3,52$ f.

2. Calculer l'élévation de température d'un calorimètre dont la masse en eau totale est de 1 250 g lorsqu'un courant de 10 ampères traverse pendant 2 min un fil de manganine de 5 m de longueur et de 1 mm² de section plongé dans le calorimètre. La résistivité de la manganine vaut $44 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$.

SOLUTION. — La résistance du fil de manganine vaut :

$$R = \rho \frac{l}{s}; R = \frac{44 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 10^2}{10^{-2}} = 2,2 \Omega.$$

La quantité de calories dégagées est : $Q = 0,24 I^2 R t$; $Q = 0,24 \cdot 10^2 \cdot 2,2 \cdot 120 = 6336$ cal.

L'élévation de température du calorimètre est : $6336 / 1250 = 5^\circ$.

4. LOIS DE KIRCHHOFF.

155. COURANTS DÉRIVÉS. — Considérons un circuit qui se partage entre les deux points L et L' en deux branches C₁ et C₂ (fig. 206). Chacune de ces branches constitue un circuit dérivé.

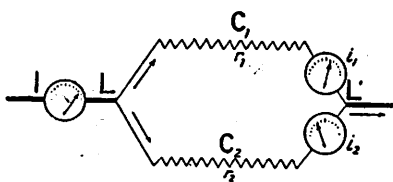


Fig. 206.

Recherchons les relations entre les intensités des courants dans les circuits dérivés et l'intensité du courant dans le circuit principal. Ces relations, dues à Kirchhoff (physicien allemand : 1824-1887), se trouvent aisément.

Désignons par I l'intensité du courant principal, par i₁ et i₂ les intensités des courants dérivés, par r₁ et r₂ les résistances des circuits dérivés et par U la différence de potentiel entre les points L et L'.

1°) Puisqu'il ne peut y avoir accumulation d'électricité en un point du circuit, nous devons avoir :

$$\boxed{I = i_1 + i_2} \quad (1)$$

D'ailleurs, des ampèremètres disposés sur le circuit principal et sur les circuits dérivés vérifient expérimentalement cette relation.

La somme des intensités des courants dérivés est égale à l'intensité du courant principal.

2°) Appliquons la loi d'Ohm aux deux circuits dérivés C_1 et C_2 , nous obtenons :

$$U = i_1 r_1 \quad \text{et} \quad U = i_2 r_2.$$

Nous en tirons :

$$\boxed{\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}} \quad (2)$$

Les intensités des courants dans les circuits dérivés sont inversement proportionnelles aux résistances de ces circuits.

3°) Désignons par R la résistance unique qui, substituée aux circuits dérivés C_1 et C_2 , ne modifierait pas l'intensité I du courant principal. *et la leur*

Cette résistance, qui est appelée **résistance équivalente**, est telle que :

$$U = IR$$

$$\text{Or,} \quad i_1 = \frac{U}{r_1}, \quad i_2 = \frac{U}{r_2}, \quad I = \frac{U}{R}$$

Remplaçons dans la relation (1) chacun des termes par leur valeur correspondante, nous obtenons :

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2}$$

ou

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}$$

L'inverse de la résistance équivalente (conductance équivalente) est égal à la somme des inverses des résistances (conductances) des circuits dérivés.

Si le circuit principal se subdivise en plus de deux circuits dérivés, un raisonnement analogue nous conduit aux relations générales :

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + \dots = \Sigma i;$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \dots = \Sigma \frac{1}{r}.$$

156. APPLICATIONS DES COURANTS DÉRIVÉS. —

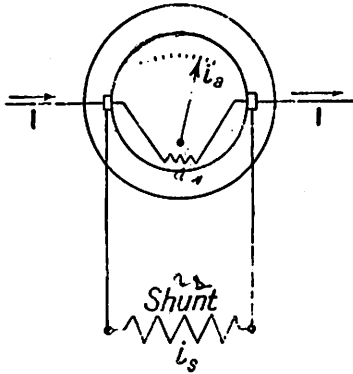


Fig. 207.

1°) **Shunt.** — On peut utiliser les ampèremètres pour mesurer des courants plus intenses que ne le permet leur graduation; on détourne à cet effet une partie du courant dans une dérivation placée aux bornes de l'appareil : cette dérivation est appelée **shunt** (fig. 207). Désignons par I l'intensité du courant à mesurer, par i_a l'intensité indiquée par l'ampèremètre, par i_s l'intensité du courant dans le shunt, par r_a la résistance de l'ampèremètre et par r_s la résistance du shunt. L'application des formules (1) et (2) (n° 155) donne :

$$I = i_a + i_s \quad \text{et} \quad \frac{i_a}{i_s} = \frac{r_s}{r_a} + 1$$

De ces relations, nous tirons :

$$\frac{i_a + i_s}{i_a} = \frac{r_s + r_a}{r_s} \quad \text{ou} \quad \frac{I}{i_a} = \frac{r_s + r_a}{r_s}$$

L'intensité du courant I est donc donnée par la relation :

$$I = i_a \frac{r_a + r_s}{r_s}$$

Ordinairement, la résistance du shunt est 9, 99, 999, ... fois plus petite que la résistance de l'ampèremètre. La formule de l'ampèremètre shunté devient donc selon le cas :

$$I = 10 i_a ; \quad I = 100 i_a ; \quad I = 1000 i_a$$

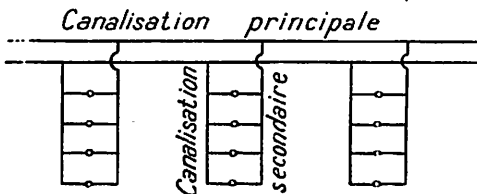


Fig. 208.

L'intensité du courant à mesurer vaut donc 10, 100, 1000, ... fois l'intensité du courant indiquée par l'ampèremètre.

2°) **Groupe ment des lampes à incandescence.** — Les canalisations secondaires qui desservent les habitations sont branchées en dérivation sur la canalisation principale ; les lampes à incandescence sont placées elles-mêmes en dérivation sur les canalisations secondaires (fig. 208).

Les canalisations secondaires qui desservent les habitations sont branchées en dérivation sur la canalisation principale ; les lampes à incandescence sont placées elles-mêmes en dérivation sur les canalisations secondaires (fig. 208).

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Un circuit est constitué d'une partie principale comprenant une résistance fixe de 5Ω et un rhéostat de 0 à 15Ω ainsi que des résistances de 75Ω et de 50Ω placées en dérivation. La tension aux bornes du circuit est de 100 V . a) Calculer les intensités de courant dans les circuits dérivés si le rhéostat est intercalé entièrement dans le circuit. b) Quelle partie du rhéostat doit-on mettre hors circuit pour que les intensités de courant dans les circuits dérivés s'élèvent aux $5/4$ de leurs valeurs ? c) Calculer dans les deux cas, la différence de potentiel aux bornes des circuits dérivés.

SOLUTION. — a) La résistance équivalente des circuits dérivés est telle que :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}; \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{75} + \frac{1}{50} = \frac{5}{150}$$

$$R = 30 \Omega.$$

La résistance totale R_t du circuit vaut : $R_t = 5 + 30 + 15 = 50 \Omega$.

L'intensité du courant I dans le circuit principal est : $I = U/R_t; I = 100/50 = 2 \text{ A}$.

Les intensités de courant i_1 et i_2 dans les circuits dérivés sont :

$$i_1 = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \quad i_1 = 2 \cdot \frac{50}{125} = 0,8 \text{ A} \quad \text{et} \quad i_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}; \quad i_2 = 2 \cdot \frac{75}{125} = 1,2 \text{ A}.$$

b) Pour que les intensités de courant dans les circuits dérivés augmentent de $1/4$, il faut que l'intensité du courant dans le circuit principal augmente de $1/4$. L'intensité du courant I dans le circuit principal doit donc être de $2,5 \text{ A}$. La résistance totale R du circuit doit devenir :

$$R_t = \frac{U}{I}; \quad R_t = \frac{100}{2,5} = 40 \Omega.$$

La partie x du rhéostat à maintenir dans le circuit vaut :

$$5 + 30 + x = 40; \quad x = 5 \Omega.$$

Le rhéostat doit être mis aux deux tiers hors circuit.

c) La différence de potentiel aux bornes des circuits dérivés est :

dans le premier cas : $U = IR; U = 2 \cdot 30 = 60 \text{ V}$.
 dans le second cas : $U = IR; U = 2,5 \cdot 30 = 75 \text{ V}$.

EFFET CHIMIQUE

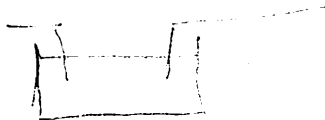
§ 3. PASSAGE DU COURANT DANS LES LIQUIDES.

157. GÉNÉRALITÉS. — Si un liquide est soumis à une différence de potentiel, deux cas peuvent se présenter :

1^o) Le courant ne passe pas; le liquide se comporte comme un isolant : tels sont l'eau pure, le pétrole, l'alcool, la benzine,...

2^o) Le courant passe; le liquide est conducteur. Parmi les liquides conducteurs, nous distinguerons : a) les liquides qui ne subissent aucune modification chimique sous l'action du courant et qui se comportent donc comme des conducteurs métalliques : tels sont le mercure et les métaux en fusion; b) les liquides que le passage du courant décompose : tels sont les sels métalliques, les acides et les hydroxydes basiques en fusion ou en dissolution dans l'eau.

Nous appellerons **électrolyse** le phénomène de décomposition chimique produit par le courant électrique; **électrolyte**, le liquide qui subit la décomposition; **électrodes**, les conducteurs plongeant dans l'électrolyte et reliés au générateur; **anode**, l'électrode reliée au pôle positif du générateur; **cathode**, l'électrode reliée au pôle négatif du générateur.



V_k - V_L = IR
= 2 \cdot 30 = 60 V
V_k - V_L = 1 \cdot R
= 2,5 \cdot 30 = 75 V

158. LOIS QUALITATIVES DE L'ÉLECTROLYSE.

Expériences. — 1^o **Électrolyses simples.** — L'électrolyse entre des électrodes en platine du chlorure de sodium en fusion donne à la cathode du sodium liquide et à l'anode un dégagement de chlore. De même l'électrolyse des sels fondus : chlorure de potassium, chlorure de plomb, chlorure de calcium, chlorure de magnésium, oxyde d'aluminium fournit le métal à la cathode et le métalloïde à l'anode.

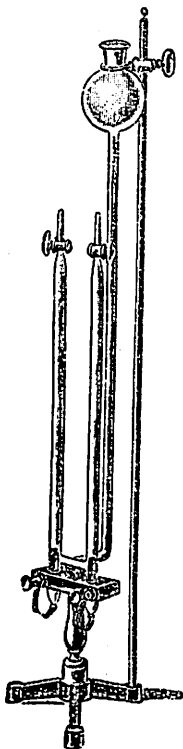


Fig. 209.

2^o **Électrolyses à réactions secondaires.** — Cependant, la plupart des électrolyses ne présentent pas un aspect aussi simple. En effet, les substances libérées aux électrodes sont douées d'une grande affinité chimique; aussi, ces substances réagissent entre elles, avec l'électrolyte, avec le dissolvant ou avec l'électrode. Donnons quelques exemples d'électrolyse à réactions secondaires.

a) **Électrolyse de l'acide sulfurique.** ^{H₂SO₄} — Versons dans un voltamètre (fig. 209) une solution aqueuse à 10 % d'acide sulfurique et relient les électrodes en platine aux pôles d'un générateur électrique. Nous obtenons deux volumes d'hydrogène à la cathode pour un volume d'oxygène à l'anode. Tout se passe comme si l'eau avait été décomposée en ses éléments.

b) **Électrolyse de l'hydroxyde de sodium.** ^{NaOH} — Substituons dans le voltamètre à l'eau acidulée par l'acide sulfurique de l'eau alcalinisée par la soude. Nous obtenons deux volumes d'hydrogène à la cathode pour un volume d'oxygène à l'anode. Tout se passe à nouveau comme si nous avions décomposé l'eau en ses éléments.

c) **Électrolyse du sulfate de sodium.** — Versons dans un tube en U une solution de sulfate de sodium; plongeons-y deux électrodes en platine (fig. 210). Décelons la présence de l'acide dans la liqueur anodique par le virement au rouge de la teinture de tournesol; la présence de la base dans la liqueur cathodique par le virement au bleu de la teinture de tournesol. Observons un dégagement d'hydrogène à la cathode et un dégagement d'oxygène à l'anode.

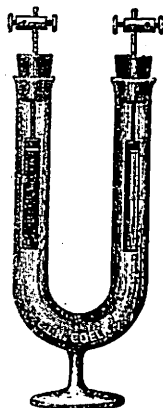


Fig. 210.

d) **Électrolyse du sulfate de cuivre entre électrodes de cuivre.** — Remplaçons dans le tube en U la solution de sulfate de sodium par une solution de sulfate de cuivre et les électrodes en platine par des électrodes en cuivre: du cuivre se dépose à la cathode tandis que du cuivre se dissout à l'anode.

L'électrolyse produit un transport de cuivre de l'anode à la cathode.

Lois qualitatives de l'électrolyse. — Le passage du courant dans un électrolyte fait apparaître l'hydrogène ou le métal à la cathode et le résidu halogénique (Cl, NO₃, SO₄...) ou le groupement hydroxyle (OH) à l'anode.

qui se font sur le
le métal ou l'hydrogène descend le courant

Les produits de l'électrolyse apparaissent **exclusivement et simultanément** aux électrodes dès le passage du courant, quelle qu'en soit l'intensité.

théorie de la dissociation électrolytique

159. THÉORIE D'ARRHÉNIUS. — L'explication des phénomènes électrolytiques est due à Arrhénius (savant suédois : 1859-1929) qui formula en 1887 une théorie aussi hardie que féconde :

1^o) Toute molécule d'électrolyte, par le seul fait de la dissolution dans un solvant approprié (eau), se scinde en deux fragments électrisés appelés ions. La dissociation préexiste au passage du courant. En effet :

a) Si la scission de la molécule était attribuable au courant, elle ne pourrait se produire au-dessous d'une tension électrique minimum correspondant au travail de scission; or, l'électrolyse du sulfate de cuivre entre électrodes de cuivre se produit si faible que soit la tension appliquée aux électrodes; donc, la dissociation électrolytique du sulfate de cuivre est préalable au passage du courant.

b) L'apparition simultanée et immédiate des ions aux deux électrodes lors de la fermeture du circuit prouve que ces ions ne proviennent pas de la même molécule. L'existence préalable des ions interprète ce fait.

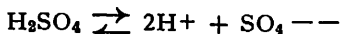
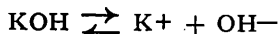
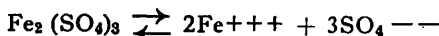
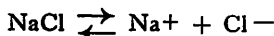
c) L'argument basé sur la pression osmotique et sur la pression de vapeur d'une solution d'électrolyte, argument qui est développé ci-dessous, concorde à faire admettre l'existence des ions dans toute solution d'électrolyte, indépendamment d'un champ électrique.

2^o) La dissociation de l'électrolyte n'est que partielle. La proportion de molécules ionisées, qui est fonction de la nature de l'électrolyte, de la température et de la concentration de la solution, peut être déterminée par diverses méthodes ^{rapport} basées sur la mesure de la résistance électrique, ~~de la pression osmotique, de la pression de vapeur de la solution.~~ Les résultats obtenus par ces diverses méthodes très différentes, pour une solution déterminée d'électrolyte sont remarquablement concordants. Cette concordance numérique constitue évidemment un argument considérable en faveur de la théorie d'Arrhénius.

3^o) Les ions sont porteurs de charges électriques positives ou négatives. L'ion positif est formé d'un atome métallique ayant perdu un nombre d'électrons égal à la valence de l'atome; l'ion négatif est formé d'un atome métalloïdique ou d'un résidu halogénique ayant fixé un nombre d'électrons égal à la valence de l'atome ou du résidu halogénique. La charge électrique portée par un ion est donc proportionnelle à sa valence. La neutralité de la solution d'un électrolyte exige que la somme algébrique des charges électriques des

Les propriétés particulières des ions les ions n'ont pas les mêmes propriétés que les atomes.

ions soit nulle. Par dissolution dans l'eau, les électrolytes se dissocient comme l'indiquent les formules suivantes :



Les ions n'ont pas les propriétés des atomes ou des résidus halogéniques qui les constituent. Dans une solution de chlorure de sodium, l'ion Na^+ ne réagit pas avec l'eau comme le fait l'atome Na; l'ion Cl^- n'a pas la couleur, l'odeur, la réactivité chimique de l'atome Cl.

Interprétation qualitative de l'électrolyse.

160. MÉCANISME DE L'ÉLECTROLYSE. — Au sein d'une solution d'électrolyte, de chlorure de sodium par exemple, il existe des molécules neutres NaCl , des ions Na^+ et des ions Cl^- . Établissons une différence de potentiel entre les deux électrodes plongeant dans la solution de l'électrolyte (fig. 211).

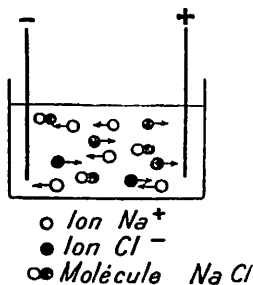


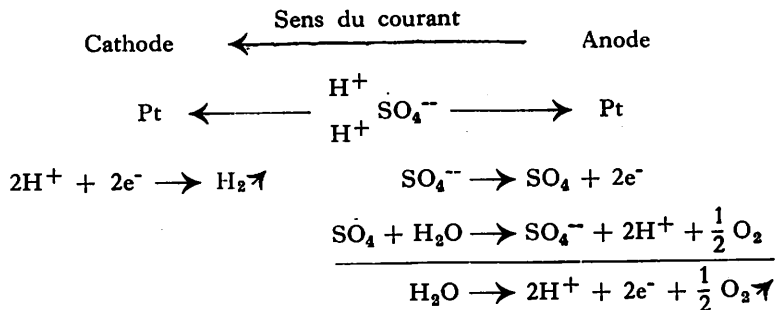
Fig. 211.

Sous l'influence du champ ainsi créé, les ions Na^+ émigrent vers la cathode (d'où leur nom de cations) et les ions Cl^- émigrent vers l'anode (d'où leur nom d'anions). Les molécules neutres NaCl ne sont aucunement influencées. Le courant est donc constitué par une double migration d'ions : le transport des charges électriques est lié à un transport de matière. Au contact des électrodes, les ions perdent leurs charges électriques par fixation ou libération d'électrons et deviennent des atomes neutres. Les atomes de chlore s'associent deux à deux pour former les molécules de chlore; les atomes de sodium réagissent avec l'eau.

Ce mécanisme de l'électrolyse explique l'apparition exclusive des produits de l'électrolyse aux électrodes puisque la neutralisation des ions ne se produit qu'aux électrodes; l'apparition immédiate des produits de l'électrolyse aux électrodes dès l'établissement du champ électrique puisqu'il se trouve toujours des ions à l'état libre au voisinage immédiat des électrodes.

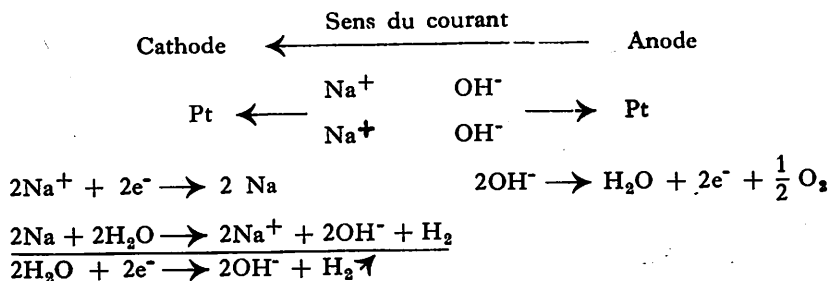
Interprétons les électrolyses réalisées au n° 158, 2° (1) :

a) **Électrolyse de l'acide sulfurique.** — L'électrolyse de l'acide sulfurique s'explique comme suit :



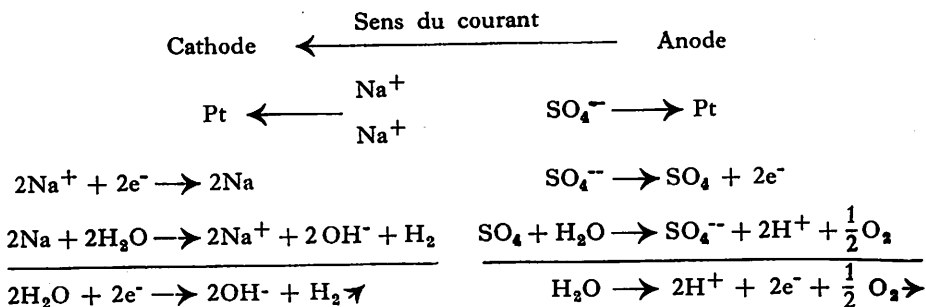
Les ions H^+ disparaissent à la cathode et apparaissent à l'anode.

b) **Électrolyse de l'hydroxyde de sodium.** — L'électrolyse de l'hydroxyde de sodium s'interprète comme suit :



Les ions OH^- disparaissent à l'anode et apparaissent à la cathode.

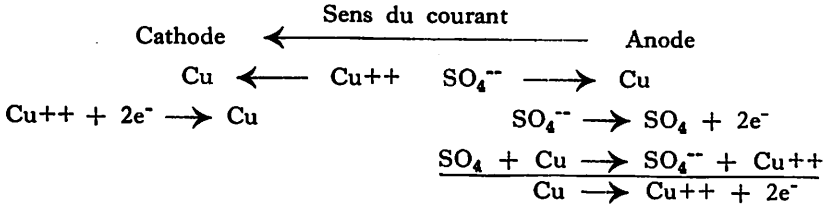
c) **Électrolyse de sulfate de sodium.** — L'électrolyse du sulfate de sodium s'interprète comme suit :



Des ions OH^- apparaissent à la cathode tandis que des ions H^+ apparaissent à l'anode.

(1) Le signe e^- représente un électron libre.

d) **Électrolyse du sulfate de cuivre.** — L'électrolyse du sulfate de cuivre s'explique comme suit :



Les ions Cu^{++} de la solution se transforment à la cathode en atomes Cu qui se déposent sur la cathode ; les atomes Cu de l'anode se transforment en ions Cu^{++} qui entrent en solution.

161. LOIS QUANTITATIVES DE L'ÉLECTROLYSE. —

Ces lois, découvertes par Faraday, sont relatives à la quantité d'électrolyte décomposée par le courant.

1^o) Intercalons dans un circuit un voltamètre contenant de l'eau rendue conductrice par un acide ou par une base. Observons que, pour la même intensité I de courant, le volume d'hydrogène dégagé à la cathode après t , $2t$, $3t$... secondes est v , $2v$, $3v$... Réduisons l'intensité du courant à $I/2$, $I/3$... et constatons que pour dégager le même volume v d'hydrogène à la cathode, il faut que le passage du courant dure $2t$, $3t$... secondes.

La masse M d'hydrogène (ou de métal) recueillie à la cathode est proportionnelle à l'intensité I et à la durée t du courant c'est-à-dire à la quantité Q d'électricité qui a traversé l'électrolyte.

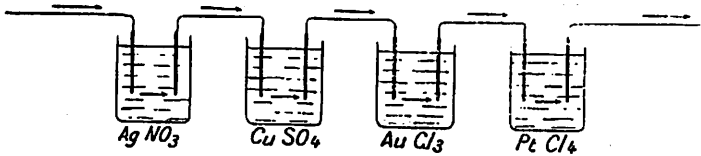


Fig. 212.

2^o) Le courant électrique passe dans quatre voltamètres disposés les uns à la suite des autres et contenant les électrolytes suivants (fig. 212) :

Nitrate d'argent. Sulfate de cuivre. Chlorure d'or. Chlorure de platine.
 AgNO_3 CuSO_4 AuCl_3 PtCl_4

Lorsqu'il se sera déposé sur la cathode du premier voltamètre une masse d'argent égale à un atome-gramme d'argent c'est-à-dire 108 grammes, les dépôts métalliques sur les cathodes des différents voltamètres seront respectivement :

Ag : 108 g. Cu : 31,75 g. Au : 65,33 g. Pt : 48,5 g.

Or, les atomes-grammes de ces différents éléments sont :

Ag : 108 g. Cu : 63 g. Au : 196 g. Pt : 194 g.

Les dépôts sur les cathodes des différents voltamètres valent donc :

Ag : 1 atome-gr. Cu : 1/2 atome-gr. Au : 1/3 atome-gr. Pt : 1/4 atome-gr.

D'autre part, les valences rompues dans les réactions de décomposition sont respectivement :

Ag : 1 valence Cu : 2 valences Au : 3 valences Pt : 4 valences

La masse de métal recueillie à la cathode est proportionnelle à la masse atomique M_a du métal et inversement proportionnelle au nombre n de valences rompues dans la réaction.

3^o) Des mesures précises ont montré que le passage de 96 500 coulombs dépose :

Argent : 108 g c'est-à-dire 1 atome-gramme.

Cuivre : 31,75 g c'est-à-dire 1/2 atome-gramme.

Or : 65,33 g c'est-à-dire 1/3 atome-gramme.

Platine : 48,5 g c'est-à-dire 1/4 atome-gramme.

Métal quelconque : $\frac{M_a}{n}$ g c'est-à-dire $\frac{1}{n}$ atome-gramme.

Le rapport M_a/n est appelé **valence-gramme** ou **équivalent électro-chimique**; la quantité de 96 500 coulombs est désignée sous le nom de **faraday**.

162. EXPRESSION MATHÉMATIQUE DES LOIS DE FARADAY. — La masse M de substance libérée à la cathode par le passage de Q coulombs se calcule facilement :

Puisque 96 500 coulombs libèrent M_a/n grammes de substance, Q coulombs libèrent une masse M donnée par la relation :

$$M = \frac{Q}{96\,500} \cdot \frac{M_a}{n} \quad \text{ou} \quad \boxed{M = \frac{It}{96\,500} \cdot \frac{M_a}{n}}$$

La masse M_e d'électrolyte décomposée découle immédiatement de la relation précédente :

$$M_e = \frac{It}{96\,500} \cdot \frac{M_m}{n}$$

M_m désignant la masse moléculaire de l'électrolyte.

163. INTERPRÉTATION DES LOIS QUANTITATIVES DE L'ÉLECTROLYSE. — Première loi. — Puisque ce sont les ions qui cèdent leurs charges aux électrodes, la charge électrique libérée est proportionnelle au nombre d'ions neutralisés. D'autre part, la quantité de matière libérée aux électrodes est également proportionnelle au nombre d'ions neutralisés. Il y a donc proportionnalité entre la quantité d'électricité qui traverse la solution et la masse d'électrolyte décomposée.

Seconde loi. — La charge d'un ion bivalent, trivalent,... étant double, triple,... de la charge d'un ion monovalent, il s'ensuit que, lorsqu'il se dépose à la cathode un atome-gramme d'un élément monovalent, il se dépose la moitié d'un atome-gramme d'un élément bivalent, le tiers d'un atome-gramme d'un élément trivalent,... puisque tout atome-gramme renferme le même nombre d'atomes (nombre d'Avogadro).

164. CHARGE D'UN ÉLECTRON. — Le quotient de 96 500 coulombs par le nombre d'Avogadro ($60,2 \cdot 10^{22}$) ⁽¹⁾ nous fournit la charge d'un ion monovalent. Cette charge, qui est celle de l'électron, vaut :

$$e = \frac{96\ 500}{60,2 \cdot 10^{22}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C ou } 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ u e s de charge.}$$

165. APPLICATIONS. — Les applications de l'électrolyse sont très nombreuses. Signalons :

1^o) La préparation des métaux alcalins (potassium, sodium), des métaux alcalino-terreux (calcium, baryum), du magnésium, du zinc par électrolyse de leurs sels fondus ; la préparation de l'aluminium par électrolyse de la bauxite ; la production de grandes masses d'hydrogène et d'oxygène par électrolyse d'une solution alcaline ; la fabrication du chlore, de la soude, de la potasse, des hypochlorites, des chlorates par électrolyse d'une solution de chlorure de sodium ou de potassium ; la préparation d'une foule de composés organiques ; l'affinage du cuivre (cuivre électrolytique), du fer (fer électrolytique),...

2^o) La galvanoplastie consiste à déposer une couche de cuivre sur un moule représentant le modèle (médaille, œuvre d'art,...) à reproduire. Le moule, fabriqué en gutta-percha et enduit de plombagine pour le rendre conducteur, est plongé dans un bain de sulfate de cuivre légèrement acidulé. Le moule constitue la cathode, une plaque de cuivre constitue l'anode. Le passage du courant, dans des condi-

(1) Le nombre d'Avogadro est le nombre de molécules contenues dans une molécule-gramme d'une substance. (Voir « Cours de Chimie », par Jodogne et Dessart, tome I, n° 52.)

tions déterminées d'intensité de courant, de température et de concentration du bain, produit sur le moule un dépôt de cuivre particulièrement adhérent.

3^o) La galvanisation consiste à produire par électrolyse le dépôt d'une mince couche d'or, d'argent, de nickel, de chrome,... sur des objets fabriqués en métal ordinaire.

4^o) L'analyse chimique utilise les phénomènes d'électrolyse pour le dosage de nombreux éléments : cuivre, plomb, étain,...

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer : a) l'intensité du courant qui, traversant un voltamètre à sulfate de cuivre, y dépose une masse de 3,175 g de cuivre en 20 minutes; b) la masse de sulfate de cuivre décomposée.

SOLUTION. — a) La formule de Faraday donne :

$$I = \frac{96\,500 M_n}{M_a t}; I = \frac{96\,500 \cdot 3,175 \cdot 2}{63,5 \cdot 1\,200} = 8,04 \text{ A.}$$

b) Sachant que la molécule-gramme de sulfate de cuivre vaut 159,5 g, la masse de sulfate de cuivre décomposée est : 7,975 g.

2. Quelle est la masse d'eau décomposée par le passage d'un courant de 16,1 A pendant 1 h ?

SOLUTION. — Lorsque 96 500 C ont traversé le voltamètre, on a recueilli : à la cathode une valence-gramme d'hydrogène c'est-à-dire 1 g, à l'anode une valence-gramme d'oxygène c'est-à-dire 8 g (16/2). La masse d'eau décomposée est donc de 9 g.

La masse d'eau décomposée par le passage d'un courant de 16,1 A pendant 1 h est donc :

$$M = \frac{It}{96\,500} \cdot \frac{M_m}{n}; M = \frac{16,1 \cdot 3\,600 \cdot 18}{96\,500 \cdot 2} = 5,4 \text{ g.}$$

3. Pendant combien de temps faut-il laisser passer un courant de 1 A dans un voltamètre à sulfate de cuivre pour former sur la cathode une couche d'épaisseur uniforme de 0,5 mm ? La cathode est un disque de 2 cm de diamètre et de 5 mm d'épaisseur (masse spécifique du cuivre : 8,9 g/cm³).

SOLUTION. — Volume de la cathode avant l'électrolyse :

$$V = \pi r^2 h; V = 3,14 \cdot 1^2 \cdot 0,5 = 1,57 \text{ cm}^3.$$

Volume de la cathode après l'électrolyse :

$$V = \pi r^2 h; V = 3,14 \cdot 1,05^2 \cdot 0,6 = 2,077 \text{ cm}^3.$$

Volume de cuivre déposé à la cathode : 2,077 — 1,57 = 0,507 cm³.

Masse de cuivre déposée à la cathode : 8,9 · 0,507 = 4,5123 g.

Les lois de Faraday donnent :

$$t = \frac{96\,500 n M}{I M_a}; t = \frac{96\,500 \cdot 2 \cdot 4,5123}{1 \cdot 63,5} = 13\,713 \text{ s ou } 3 \text{ h } 48 \text{ min } 33 \text{ s.}$$

§ 4. PILES.

1. PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

166. EFFET VOLTA.

Expérience. — Touchons le plateau collecteur en cuivre de l'électroscope condensateur avec le cuivre d'une lame cuivre-zinc, le zinc étant tenu à la

main (fig. 213). Constatons, après avoir enlevé le plateau condenseur, que l'électroscope s'est chargé négativement : le cuivre de la lame cuivre-zinc est donc chargé négativement.

En répétant cette expérience en en faisant varier les conditions, nous aboutirions à la conclusion suivante :

Conclusion. — Le simple contact de deux corps différents produit entre eux une différence de potentiel. Cette différence de potentiel dépend de la nature des corps en contact et de la température; elle est indépendante de la forme et de l'état d'électrisation de ces corps ainsi que de la surface de contact. Indiquons quelques différences de potentiel produites par le contact de deux métaux : Argent/Cuivre : 0,08 volt; Cuivre/Fer : 0,17 volt; Fer/Zinc : 0,75 volt; Cuivre/Zinc : 0,92 volt.

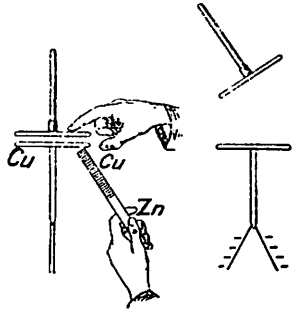


Fig. 213.

167. LOI DES CHAINES MÉTALLIQUES. — Dans une chaîne formée de différents métaux, la différence de potentiel entre les métaux terminaux est la même que celle qui existe entre ces deux métaux mis en contact immédiat, à condition toutefois que la température soit uniforme.

Exemple : 1^{re} chaîne : Argent/Cuivre/Fer/Zinc 1 V
 2^{me} chaîne : Argent/Zinc 1 V.

Il résulte de cette loi :

1^o) Une chaîne exclusivement métallique terminée par deux métaux identiques ne présente aucune différence de potentiel.

Vérification expérimentale. — Touchons le plateau en cuivre de l'électroscope condensateur avec le zinc de la lame cuivre-zinc, le cuivre étant tenu à la main (fig. 214). L'électroscope ne manifeste aucune électrisation. Le cuivre du plateau de l'électroscope était donc au potentiel zéro comme le cuivre de la lame cuivre-zinc.

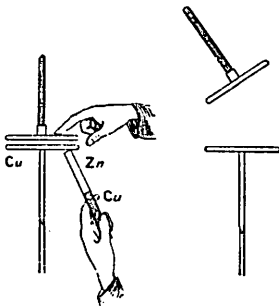


Fig. 214.

2^o) Une chaîne exclusivement métallique formant un circuit fermé n'est le siège d'aucun courant électrique malgré les différences de potentiel existant entre les métaux successifs.

Ce fait est en accord avec le principe de la conservation de l'énergie: le circuit ne peut être le siège d'aucun courant électrique puisqu'il ne peut y avoir production d'énergie électrique sans dépense équivalente d'énergie sous l'une ou l'autre forme.

168. LOI DES CHAINES A ÉLECTROLYTE.

Expérience. — Interposons un morceau de drap imbibé d'eau acidulée d'acide sulfurique entre le plateau collecteur de l'électroscope condensateur et le zinc de la lame cuivre-zinc, le cuivre étant tenu en main (fig. 215). L'électroscope se charge positivement.

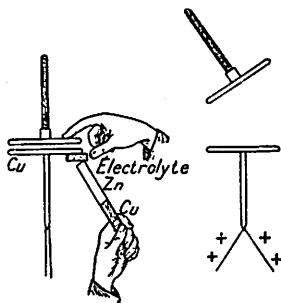


Fig. 215.

Conclusion. — Les chaînes à électrolyte échappent à la loi des chaînes métalliques. Alors que les deux cuivres terminaux de la chaîne métallique Cuivre/Zinc/Cuivre ne présentent aucune différence de potentiel, les deux cuivres terminaux de la chaîne à électrolyte : Cuivre/Zinc/Acide sulfurique/Cuivre présentent une différence de potentiel.

Conséquence. — Les métaux terminaux de la chaîne Cuivre/Zinc/Acide sulfurique/Cuivre présentant une différence de potentiel, le fil conducteur qui relie les extrémités de la chaîne est le siège d'un courant électrique. C'est le principe même de la pile hydro-électrique.

2. PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES. (1)

† 169. PILE DE VOLTA.

Expériences. — 1. Dans un vase contenant une solution aqueuse d'acide sulfurique à 10 %, plongeons une lame de cuivre et une lame de zinc pur ou de zinc amalgamé (2). L'acide n'attaque ni la lame de cuivre, ni la lame de zinc. Relions les lames de cuivre et de zinc aux bornes positive et négative

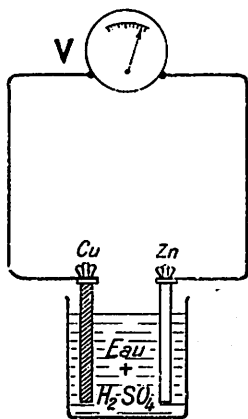


Fig. 216.

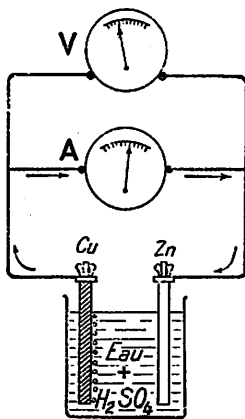


Fig. 217.

(1) Ces générateurs ont été appelés piles parce que Volta constitua son premier générateur en disposant en une colonne des disques cuivre-zinc séparés entre eux par des rondelles de drap imbibé d'acide sulfurique.

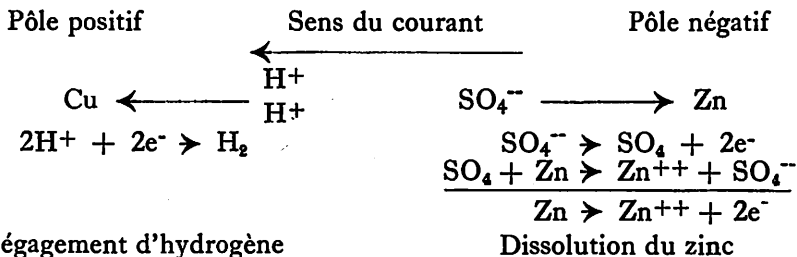
(2) Le zinc commercial, toujours impur, se dissout dans l'acide sulfurique. Le zinc amalgamé est obtenu en découpant le zinc ordinaire par l'acide chlorhydrique et en le plongeant ensuite dans le mercure. Le zinc amalgamé ne se dissout pas dans l'acide sulfurique.

d'un voltmètre, nous observons que cet appareil indique une différence de potentiel d'un volt environ (fig. 216). L'indication du voltmètre ne change pas si nous rapprochons ou écartons les lames, si nous les plongeons plus profondément dans la solution acide, etc...

2. Fermons le circuit de la pile sur une faible résistance constituée d'un ampèremètre et de fils conducteurs (fig. 217) : l'aiguille de l'ampèremètre dévie indiquant le passage du courant dans le circuit, le zinc se dissout et des bulles d'hydrogène apparaissent sur la lame de cuivre.

Conclusion. — L'appareil formé de la chaîne Zinc/Acide sulfurique/Cuivre est une source de courant; il constitue la pile la plus simple.

Interprétation électronique. — La réaction chimique qui donne naissance au courant est traduite dans le schéma suivant :



La Chimie nous apprend que l'affinité du groupement SO_4 est beaucoup plus grande pour le zinc que pour le cuivre. A **circuit ouvert**, les ions SO_4^{--} — provenant de l'ionisation de l'acide sulfurique, arrachent à la lame de zinc des ions Zn^{++} : la lame de zinc se charge donc d'électrons. Cependant, la dissolution du zinc ne tarde pas à s'arrêter car la lame de zinc électrisée négativement repousse les ions SO_4^{--} en dehors de toute zone d'influence. A **circuit fermé**, les électrons libres en excès sur le zinc se rendent sur le cuivre par le conducteur reliant la lame de zinc à la lame de cuivre. Le cuivre attire les ions H^+ et les neutralise en se débarrassant des électrons. Le phénomène de dissolution du zinc se poursuit puisque les électrons libérés sur le zinc passent sur le cuivre où ils sont utilisés à la neutralisation des ions H^+ . Le courant dans l'électrolyte est constitué par une double migration d'ions, alors que dans le conducteur métallique il est constitué par une circulation d'électrons.

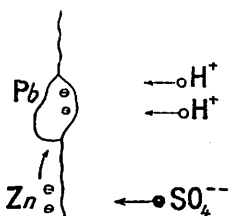


Fig. 218.

Nous savons cependant que le zinc commercial placé dans une solution d'acide sulfurique s'y dissout intégralement. La dissolution est due aux impuretés (plomb, antimoine, arsenic...) que le zinc renferme.

Les électrons libérés sur le zinc par l'action dissolvante des ions SO_4^{--} — passent sur le plomb qui attire les ions H^+ ; ces derniers sont neutralisés (fig. 218). Plomb, zinc et électrolyte forment une petite pile à circuit fermé.

En frottant le zinc avec du mercure, on annihile l'action des impuretés : le zinc amalgamé ne se dissout plus dans la solution sulfurique à circuit ouvert. On emploie du zinc amalgamé dans les piles où le zinc plonge dans une solution d'acide.

170. POLARISATION. *d'un voltmètre.*

Expérience. — Laissons la pile de Volta débiter du courant dans le circuit (fig. 202). Nous observons qu'après quelque temps les déviations de l'ampèremètre et du voltmètre diminuent progressivement et finissent même par s'annuler : l'intensité du courant dans le circuit et la différence de potentiel aux bornes de la pile faiblissent donc progressivement et finissent par s'annuler. La pile est dite **polarisée**.

Secouons la lame de cuivre : les bulles d'hydrogène qui recouvrent la lame de cuivre se dégagent et le courant passe à nouveau dans le circuit. Cependant l'intensité de ce courant faiblit et s'annule à nouveau.

Conclusion. — La polarisation de la pile de Volta est due à la formation d'une gaine isolante d'hydrogène sur la lame positive. Le passage du courant substitue à la chaîne Zinc/Acide sulfurique/Cuivre la chaîne Zinc/Acide sulfurique/Hydrogène/Cuivre.

Pour rendre une pile utilisable, il faut en empêcher la polarisation : on y arrive en remplaçant l'acide par un sel qui substituera un dépôt métallique à la gaine d'hydrogène ou en ajoutant à l'acide un oxydant qui transformera l'hydrogène en eau au fur et à mesure de sa formation. La pile est dite **pile à dépolarisant**. Nous étudierons quelques types de piles à dépolarisant.

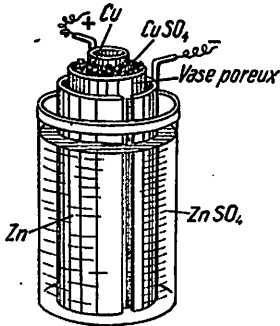
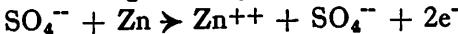


Fig. 219.

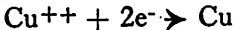
171. PILE DE DANIELL (fig. 219). —

L'électrode négative est constituée d'une lame cylindrique de zinc plongeant dans une solution de sulfate de zinc. Le cylindre de zinc entoure un vase poreux contenant une solution saturée de sulfate de cuivre dans laquelle plonge l'électrode positive constituée d'une lame de cuivre.

Réunissons les bornes de la pile par un conducteur : le courant passe dans le circuit extérieur du cuivre au zinc, dans le circuit intérieur du zinc au cuivre. A l'électrode négative, il y a dissolution du zinc

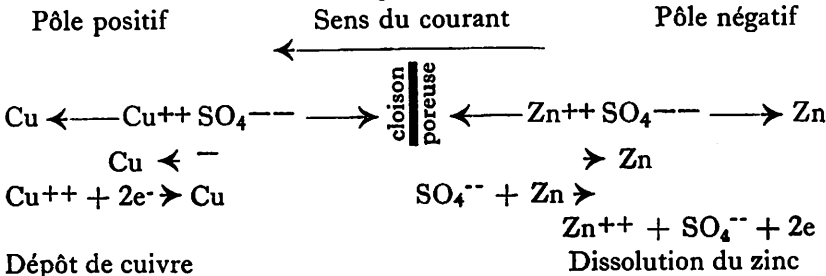


A l'électrode positive, il y a dépôt de cuivre



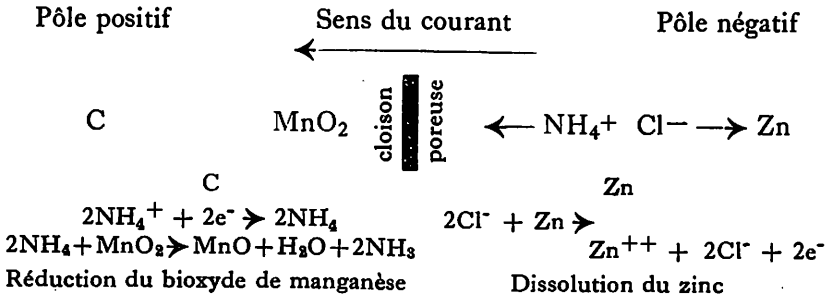
L'électrode positive n'est donc pas affectée et le passage du courant laisse intacte la chaîne Cuivre/Sulfate de cuivre/Sulfate de zinc/Zinc.

Le schéma suivant rend compte de ces modifications :



172. PILE LECLANCHÉ (fig. 220). — L'électrode négative est une lame de zinc plongeant dans une solution de chlorure d'ammonium; l'électrode positive est une lame de charbon de cornue plongeant dans un mélange de coke pulvérisé et de bioxyde de manganèse.

Le schéma suivant rend compte des modifications qui se passent à circuit fermé :



Les piles sèches sont des piles Leclanché dont l'électrode négative en zinc forme le récipient et dont la solution de chlorure d'ammonium est immobilisée par une matière spongieuse : sciure de bois, papier buvard, amidon...

173. PILE POGGENDORF (fig. 221). — Une lame de zinc (électrode négative) comprise entre deux lames de charbon de cornue

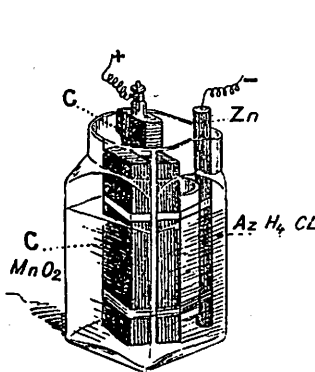


Fig. 220.

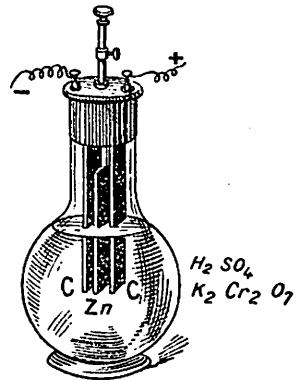
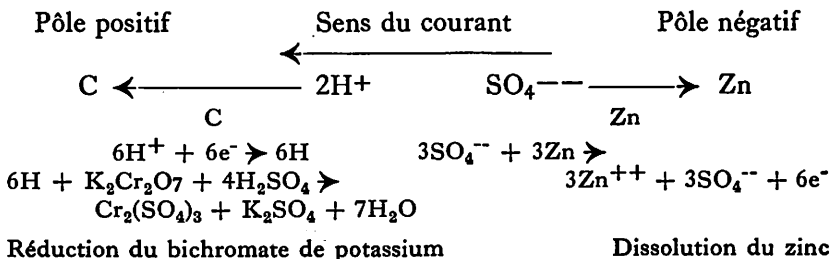


Fig. 221.

(électrode positive) plonge dans une solution d'acide sulfurique et de bichromate de potassium.

Le schéma suivant rend compte des modifications qui se produisent à circuit fermé :



174. CARACTÉRISTIQUES DES PILES.

Force électromotrice. — La différence de potentiel constatée aux bornes d'une pile à circuit ouvert constitue la **force électromotrice** E de la pile. La force électromotrice d'une pile est indépendante des dimensions des éléments constitutifs, du potentiel auquel peut être portée l'une des bornes; elle dépend uniquement de la nature des substances constitutives.

Résistance interne. — A circuit fermé, le courant ne passe pas seulement dans la résistance extérieure mais aussi dans la pile. Cette dernière, comme tout conducteur, oppose une résistance au passage du courant. Cette résistance, appelée résistance interne de la pile, dépend naturellement du type de pile envisagé mais aussi de la surface des électrodes, de la distance qui les sépare, de la présence ou de l'absence d'un vase poreux.

Le tableau suivant donne les caractéristiques des piles décrites (modèle courant) :

Caractéristiques des piles.

Type	Electrolyte	Dépolarisant	Force électromotrice	Résistance interne	Observations
Volta	H ₂ SO ₄	—	1 volt	—	inutilisable
Daniell	ZnSO ₄	CuSO ₄	1,1 volt	0,4 à 0,6 ohm	utilisée pour des courants permanents (téléphone)
Bunsen	H ₂ SO ₄	HNO ₃	1,8 volt	0,2 ohm	inconvenients : dégagement de vapeurs nitreuses
Leclanché	NH ₄ Cl	MnO ₂	1,5 volt	3 à 5 ohms	se polarise vite; utilisée pour courants intermittents ou pour courants faibles (sonnerie, T S F)
Poggendorf	H ₂ SO ₄	K ₂ Cr ₂ O ₇	2 volts	0,1 ohm	

***175. PILES ÉTALONS.** — On réalise des piles qui, ayant une force électromotrice pratiquement indépendante de la température, servent d'étalons de force électromotrice. Nous ne décrivons que la pile étalon de Weston. Cette pile est constituée de la chaîne conductrice suivante : Platine/Sulfate mercurique/Sulfate de cadmium/Platine (fig. 222). Elle présente une force électromotrice de 1,0183 volt à la température de 20°.

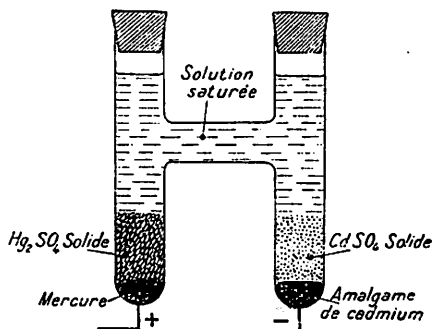
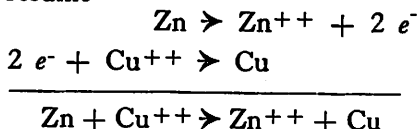


Fig. 222.

***176. ENERGIE DES PILES.** — L'énergie électrique fournie par une pile provient de la transformation de l'énergie chimique. Dans la pile Daniell, par exemple, le zinc se dissout sous forme d'ions Zn^{++} en abandonnant deux électrons. Ces deux électrons passent sur la borne de cuivre où ils précipitent les ions Cu^{++} sous forme d'atomes Cu. En résumé



Or, la Chimie nous apprend que cette réaction s'accompagne d'un dégagement de 50 500 calories par atome-gramme de zinc (65 g). Si l'énergie chimique du système Zn et Cu^{++} se transforme intégralement en énergie électrique, la pile fournit une énergie électrique valant (4,18 . 50 500) joules.

Les lois de l'électrolyse étant applicables aux phénomènes qui se passent dans la pile, la dissolution d'un atome-gramme de zinc (65 g), élément bivalent, fournit (96 500 . 2) coulombs. Cette quantité d'électricité correspond à une énergie électrique : $T = QE$; $T = (96 500 . 2 . E)$ joules (E désignant la force électromotrice de la pile).

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, il vient :

$$\begin{array}{l} 96 500 . 2 . E = 4,18 . 50 500 \\ E = 1,09 \text{ V.} \end{array}$$

Ce résultat est confirmé, à peu de chose près, par l'expérience.

***177. CAPACITÉ DES PILES.** — La capacité d'une pile est la quantité d'électricité qu'elle peut fournir. La dissolution d'une valence-gramme de zinc (65/2 g) fournit 96 500 coulombs ou 96 500/3 600 ampèreheures. La capacité d'une pile dépend donc des quantités de substances chimiques qui s'y trouvent.

178. APPLICATIONS DES PILES HYDRO-ÉLECTRIQUES.

— Les piles servent actuellement dans des applications ne nécessitant que des puissances très faibles : téléphones, télégraphes, T. S. F., sonneries, lampes portatives...

3. PILES THERMO-ÉLECTRIQUES.

*179. COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES.

Expérience. — Orientons dans la direction Nord-Sud un cadre formé d'une barre de bismuth soudée à une barre de cuivre (fig. 223). Disposons une aiguille aimantée sur le pivot fixé au centre de ce cadre; l'aiguille aimantée s'oriente vers le Nord. Le cadre n'est en effet le siège d'aucun courant électrique (n° 167). Chauffons une des soudures du cadre bismuth-cuivre; l'aiguille aimantée dévie : un courant parcourt donc le cadre. Laissons refroidir la soudure, l'aiguille aimantée revient lentement vers sa position Nord-Sud : le courant faiblit graduellement. Refroidissons cette même soudure avec de la glace, l'aiguille aimantée dévie en sens inverse de la

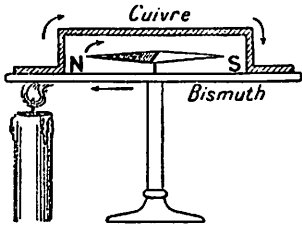


Fig. 223.

déviations précédentes : un courant de sens contraire au précédent parcourt donc le cadre.

Conclusion. — Une chaîne métallique dont les soudures ne sont pas à la même température est le siège d'un courant électrique. Ce courant, qui est dû à la transformation de l'énergie calorifique en énergie électrique, est appelé **courant thermo-électrique**.

*180. LOI DES COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES. —

La force électromotrice thermo-électrique qui s'établit entre les soudures d'un couple de métaux est fonction de la nature des métaux constituant le couple et de la différence de température entre les soudures.

Exemples : E_0^{100} couple fer-cuivre 0,0011 V
 E_0^{100} couple bismuth-antimoine 0,0057 V.

*181. APPLICATIONS DES COURANTS THERMO-ÉLECTRIQUES. — 1°) Pile de Melloni.

— Les forces électromotrices thermo-électriques étant très faibles, l'obtention de courants relativement intenses exige l'association de plusieurs couples thermo-électriques. La pile de Melloni est constituée de barreaux de bismuth alternant avec des barreaux d'antimoine (fig. 224). Ces barreaux sont disposés de manière que toutes les soudures paires soient d'un côté et que toutes les soudures impaires soient de l'autre côté. Les soudures

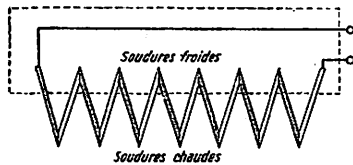


Fig. 224.

impaires sont chauffées tandis que les soudures paires restent froides. On produit dans chaque couple de soudures des forces électromotrices qui s'additionnent. Les barreaux terminaux sont reliés à deux bornes qui forment les pôles de la pile. La résistance interne de cette pile est pratiquement nulle.

2°) **Thermomètre électrique.** — Puisqu'une différence de température entre les soudures d'une chaîne métallique produit un courant thermo-électrique, la mesure de l'intensité de ce courant permet de déterminer cette différence de température.

La pile thermo-électrique de Melloni, modifiée en conséquence, peut déceler des différences très faibles de température.

Pour repérer de très hautes ou de très basses températures, on utilise le couple platine-platine rhodié (ou le couple fer-constantan) (fig. 225). La soudure S est placée dans l'enceinte dont on désire déterminer la température; les fils du couple sont reliés aux bornes d'un galvanomètre qui peut d'ailleurs être gradué directement en degrés.

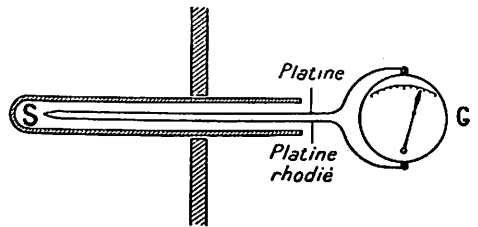


Fig. 225.

§ 5. ACCUMULATEURS.

182. FORCE ÉLECTROMOTRICE DE POLARISATION.

Expérience. — Réunissons les électrodes en platine d'un voltamètre à eau acidulée aux bornes d'un galvanomètre; l'aiguille ne dévie pas : aucun courant ne passe dans le circuit. Ce fait est d'accord avec la loi des chaînes : en effet, la chaîne Platine/Acide sulfurique/Platine ne présente pas de force électromotrice.

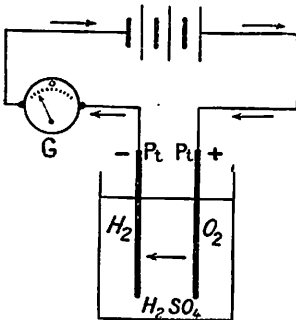


Fig. 226.

Intercalons dans le circuit un générateur électrique; l'aiguille du galvanomètre dévie : un courant électrique passe dans le circuit (fig. 226). Si les électrodes du voltamètre sont de grande surface, ce n'est qu'après un certain laps de temps que les gaz provenant de l'électrolyse se dégagent aux électrodes. Le platine, comme la plupart des métaux d'ailleurs, absorbe les gaz; les dégagements gazeux aux électrodes ne se produisent qu'après saturation du platine. Enlevons le générateur du circuit et mettons les bornes du voltamètre en communication directe avec le galvanomètre; l'aiguille dévie en sens inverse de la déviation précédente : un courant électrique de

sens inverse du courant précédent passe dans le circuit (fig. 227). Le vol-

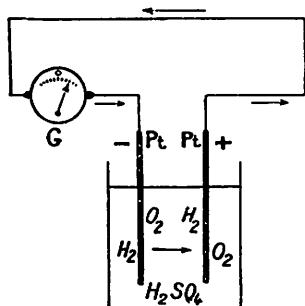


Fig. 227.

mètre fonctionne donc comme générateur, la cathode entourée d'hydrogène jouant le rôle de pôle négatif, l'anode entourée d'oxygène jouant le rôle de pôle positif. Ce phénomène n'a rien de surprenant; en effet, le passage du courant dans le voltmètre y a provoqué une modification essentielle : la chaîne Platine/Acide sulfurique/Platine s'est transformée en la chaîne Platine/Platine oxygéné/Acide sulfurique/Platine hydrogéné/Platine qui présente, comme une pile, une force électromotrice que nous désignons du nom de force électromotrice de polarisation.

Conclusion. — Le passage du courant dans un voltmètre le polarise et le transforme en **pile secondaire**.

Cependant, le courant débité par le voltmètre polarisé à électrodes en platine est de courte durée parce que les gaz absorbés par les électrodes ont rapidement disparu. Pour obtenir une pile secondaire susceptible de fournir un courant d'une durée importante, il faut pouvoir accumuler sur les électrodes de grandes quantités d'oxygène et d'hydrogène. Le plomb, par ses propriétés chimiques, se prête particulièrement à cet usage.

Remarquons qu'une pile secondaire n'accumule pas de l'énergie électrique mais de l'énergie chimique susceptible d'être transformée en énergie électrique; elle est appelée **accumulateur**.

183. ACCUMULATEURS AU PLOMB. — Le premier accu-

mulateur au plomb, qui est dû à Planté, consistait en deux lames de plomb plongeant dans une solution d'acide sulfurique à 10 %.

Charge. — Lors du passage du courant dans l'appareil, l'hydrogène dégagé à la cathode réduit l'oxyde de plomb qui recouvre la lame de plomb; l'oxygène libéré à l'anode peroxyde le plomb (fig. 228). Le schéma suivant rend compte des modifications qui se produisent pendant la charge.

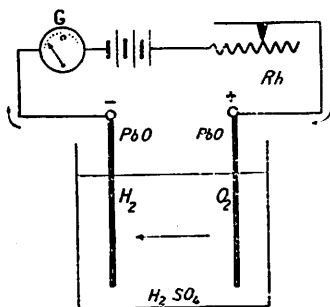
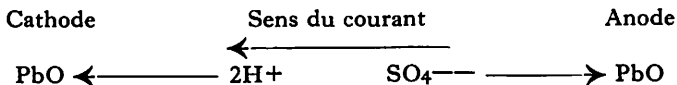
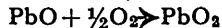
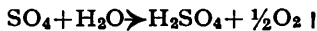


Fig. 228.



Réduction de l'oxyde de plomb



Oxydation de l'oxyde de plomb

La fin de la charge est annoncée par des dégagements gazeux aux électrodes, ce qui indique que toute la substance active a réagi. L'électrode négative a pris une teinte grise (plomb), l'électrode positive a pris une teinte brune (bioxyde de plomb).

Enlèver les garnitures.

Décharge. — Réunissons les électrodes de l'accumulateur par un circuit extérieur, l'accumulateur fournit un courant de sens inverse du courant de charge. L'hydrogène provenant de l'électrolyse se dégage à l'électrode positive et y réduit le bioxyde de plomb; l'oxygène se dégage à l'électrode négative et y oxyde le plomb (fig. 229). Le schéma suivant rend compte des modifications qui se produisent pendant la décharge.

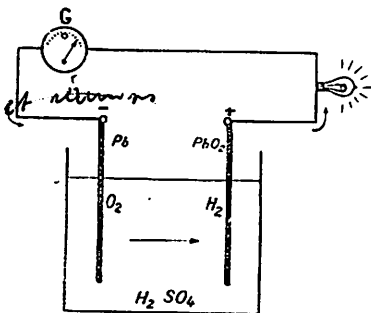
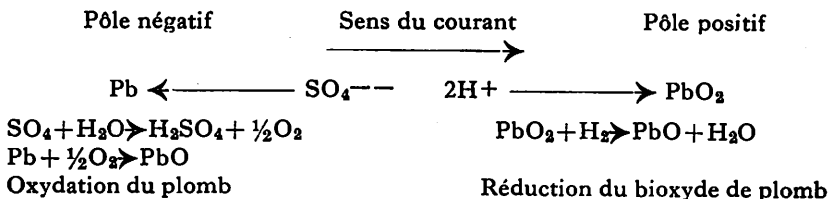


Fig. 229.



Le courant cesse lorsque les deux lames sont redevenues identiques; une nouvelle charge de l'accumulateur est nécessaire pour rendre les lames dissemblables. La force électromotrice qui, au début de la décharge, est de 2,5 volts se stabilise rapidement à 2 volts. On arrête la décharge lorsque la force électromotrice est retombée à 1,8 volt.

Modifications. — L'accumulateur tel que nous venons de le décrire présente cependant un inconvénient : sa formation est lente. Ce n'est qu'après un certain nombre de charges et de décharges successives que la masse active des électrodes est considérable et que l'accumulateur est apte à fournir un courant de longue durée. Pour éviter cette formation lente et onéreuse, Faure imagina l'emploi de plaques formées de grilles en plomb retenant dans leurs mailles des pastilles de substances actives : le minium (Pb₃O₄) pour l'anode, la litharge (PbO) pour la cathode. Ces accumulateurs sont aptes à fournir un courant de longue durée dès la première charge (fig. 230).

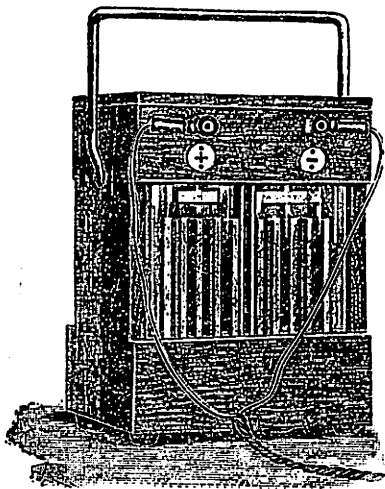


Fig. 230.

184. ACCUMULATEURS AU FER-NICKEL. — L'accumulateur au fer-nickel, inventé par Edison, est constitué de deux lames d'acier soutenant les matières actives : l'oxyde ferreux (FeO) à la cathode, l'oxyde nickелеux (NiO) à l'anode. L'électrolyte est une solution de potasse caustique. Pendant la charge, l'hydrogène à la cathode réduit l'oxyde ferreux en fer spongieux; l'oxygène à l'anode peroxyde le nickel (Ni₂O₃). Pendant la décharge, l'oxygène à la borne négative oxyde le fer (FeO), l'hydrogène à la borne positive réduit l'oxyde nickेलique en oxyde nickелеux (NiO). La force électromotrice, de 1,8 volt au début de la décharge, baisse rapidement d'abord, puis plus lentement jusqu'à 0,8 volt où l'on arrête la décharge. L'accumulateur Edison est plus léger, plus robuste, plus durable mais d'un prix plus élevé que l'accumulateur au plomb.

185. CARACTÉRISTIQUES DES ACCUMULATEURS. —

1°) **Résistance interne.** — La résistance interne des accumulateurs est pratiquement nulle : en effet la distance séparant les électrodes de grande surface est très petite et la solution d'électrolyte (acide sulfurique, potasse) est bonne conductrice. $R_i = 0,01 \Omega$

2°) **Force électromotrice.** — La force électromotrice moyenne est de 2 volts pour l'accumulateur au plomb; de 1,25 volt pour l'accumulateur au fer-nickel.

3°) **Capacité.** — La capacité d'un accumulateur est le nombre maximum de coulombs qu'il peut fournir à la décharge. Elle est, pour les accumulateurs au plomb, de l'ordre de 40 000 coulombs (11 ampèreheures) par kilogramme de plomb.

4°) **Rendement en quantité.** — Le rendement en quantité d'un accumulateur est le rapport de la quantité d'électricité débitée à la décharge à la quantité d'électricité absorbée à la charge. Ainsi un accumulateur qui absorbe 4 ampères pendant 20 heures et qui débite un courant de 2 ampères pendant 32 heures a un rendement de :

$$R^t = \frac{Q'}{Q}; R^t = \frac{2 \cdot 32}{4 \cdot 20} = 0,80.$$

Le rendement de l'accumulateur au plomb oscille entre 80 % et 85 %.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. On charge un accumulateur avec un courant de 5 A pendant 12 h. La décharge du même accumulateur dure 18 h en produisant un courant de 3 A. Calculer : a) la capacité de l'accumulateur; b) le rendement en quantité de l'accumulateur.

SOLUTION. — a) Capacité de l'accumulateur $Q = 3 \cdot 18 = 54 \text{ Ah}$ ou 194 000 C.

b) Rendement en quantité : $R^t = \frac{3 \cdot 18}{5 \cdot 12} = 0,9.$

2. Un accumulateur, qui a une capacité de 10 Ah, débite un courant de 0,5 A. On demande : a) la durée de la décharge à ce régime; b) la variation de masse de la plaque positive (PbO₂) et négative (Pb) pendant la décharge supposée complète.

SOLUTION. — a) Capacité de l'accumulateur : $Q = 10 \cdot 3\,600 = 36\,000\text{ C}$.

Durée de la décharge : $t = \frac{Q}{I}$; $t = \frac{36\,000}{0,5} = 72\,000\text{ s}$ ou 20 h.

b) Réaction à la plaque positive : $\text{PbO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{PbO} + \text{H}_2\text{O}$; deux atomes-grammes d'hydrogène (2 g) enlèvent donc un atome-gramme d'oxygène (16 g) à la plaque positive.

96 500 C produisent une perte de masse de la plaque positive de : $\frac{16}{2} = 8\text{ g}$.

36 000 C produisent une perte de masse de la plaque positive de $\frac{8 \cdot 36\,000}{96\,500} \neq 3\text{ g}$.

Réaction à la plaque négative : $\text{Pb} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{PbO}$.

96 500 C produisent une augmentation de masse de la plaque négative de : $\frac{16}{2} = 8\text{ g}$.

36 000 C produisent une augmentation de masse de la plaque négative de : $\frac{8 \cdot 36\,000}{96\,500} \neq 3\text{ g}$.

§ 6. GÉNÉRALISATION DE LA LOI D'OHM.

Nous avons vu que (n° 143) :

L'intensité du courant qui traverse un conducteur est directement proportionnelle à la tension appliquée aux extrémités de ce conducteur et inversement proportionnelle à la résistance de ce conducteur.

$$I = \frac{U}{R}$$

La loi d'Ohm, sous cette forme, ne s'applique qu'à un conducteur dans lequel il ne se passe aucun autre phénomène qu'un dégagement de chaleur. Appliquer cette relation à un moteur ou à un voltamètre, par exemple, serait absurde car, outre le dégagement de chaleur, il y a dans le moteur une production de travail mécanique, dans le voltamètre une décomposition chimique. Nous allons examiner les modifications à apporter à la loi d'Ohm dans ces cas.

1. CIRCUIT A GÉNÉRATEUR.

186. LOI D'OHM — 2^e FORME.

Expérience. — Relions les bornes d'une pile P de grande résistance interne à un circuit comprenant un rhéostat gradué R_h (résistance maximum : dix ohms), un interrupteur K et un milliampèremètre A. De gros fils de cuivre servant aux connexions, la résistance R_e du circuit extérieur se confond pratiquement avec la résistance du rhéostat. D'autre part, un voltmètre V mesure la différence de potentiel aux bornes de la pile.

A circuit ouvert, le voltmètre V indique la force électromotrice E de la pile (fig. 231). Lorsqu'à la suite de la manœuvre de l'interrupteur K la pile débite un courant dans le circuit, le voltmètre V indique une tension aux bornes U

plus faible que la force électromotrice E (fig. 232). D'autre part, la résistance totale du circuit comprend la résistance R_e du circuit extérieur et la résis-

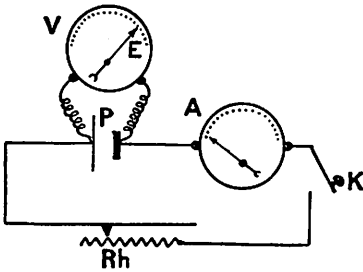


Fig. 231.

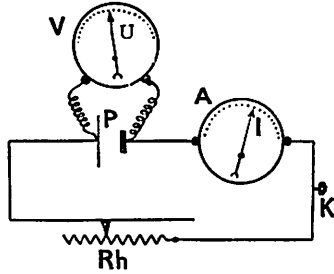


Fig. 232.

tance interne r_i de la pile. L'expérience montre que l'intensité I du courant dans le circuit, indiquée par le milliampèremètre A , est donnée par la relation:

$$I = \frac{E}{R_e + r_i}$$

Énoncé de la loi d'Ohm — 2^e forme. — L'intensité du courant qui parcourt un circuit est égale au quotient de la force électromotrice du générateur par la résistance totale du circuit.

$$I = \frac{E}{R_e + r_i}$$

Cette relation exprime la deuxième loi d'Ohm : elle est applicable à tout circuit comprenant un générateur et des résistances métalliques.

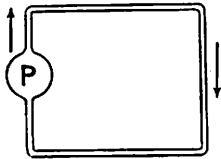


Fig. 233.

Analogie hydraulique. — Le phénomène est analogue à celui qui se passe dans une pompe qui entretient un courant d'eau dans une canalisation (fig. 233). L'énergie, fournie à l'eau par la pompe, est dissipée non seulement à vaincre la résistance de la canalisation

extérieure mais aussi celle des canalisations internes de la pompe elle-même.

187. FORCE ÉLECTROMOTRICE ET TENSION AUX BORNES. — Recherchons la relation qui unit la force électromotrice E d'un générateur à la tension aux bornes U . Appliquons la loi d'Ohm-2^e forme au circuit précédent (fig. 232) :

$$I = \frac{E}{R_e + r_i} \quad \text{d'où} \quad E = I(R_e + r_i) \quad (1)$$

Nous pouvons appliquer la loi d'Ohm - 1^{re} forme au circuit extérieur de résistance R_e puisqu'il ne s'y produit qu'un dégagement de chaleur :

$$I = \frac{U}{R_e} \quad \text{d'où} \quad U = IR_e \quad (2)$$

Divisons la relation (2) par la relation (1), nous obtenons :

$$\frac{U}{E} = \frac{R_e}{R_e + r} \quad \text{d'où} \quad U = E \frac{1}{1 + \frac{r_i}{R_e}}$$

La tension aux bornes U du générateur diminue lorsque diminue la résistance R_e du circuit extérieur.

Le graphique de la figure 234 représente la variation de la tension aux bornes U en fonction de la résistance R_e du circuit extérieur. L'analyse du graphique comme celle de la formule permet de remarquer :

1°) Si $R_e = \infty$, $U = E$; c'est ce qui nous autorise à mesurer la force électromotrice d'un générateur par la différence de potentiel aux bornes en circuit ouvert ($R_e = \infty$).

2°) Si $R_e = 0$; $U = 0$; quelle que soit l'intensité du courant, la tension aux bornes est nulle. Cette situation se produit lorsqu'on relie les bornes d'un générateur par un

fil métallique gros et court : le générateur est dit **en court-circuit**. L'intensité du courant est alors maximum et vaut : $I = E/r_i$. La mise en court-circuit des piles ne présente aucun risque car leur grande résistance interne s'oppose à une intensité trop grande du courant ; la mise en court-circuit de générateurs à faible résistance interne (accumulateurs, dynamos) produit des courants d'intensité énorme qui détériorent rapidement le générateur.

Nous pouvons aussi représenter la variation de la tension aux bornes U d'un générateur en fonction de l'intensité I du courant qui passe dans le circuit. En effet :

$$E = I(R_e + r_i) ; E = IR_e + Ir_i ; E = U + Ir_i$$

d'où :

$$U = E - Ir_i$$

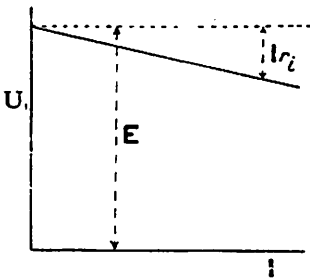


Fig. 235.

Remarquons que la tension aux bornes U diminue linéairement lorsqu'augmente l'intensité I du courant. Le graphique de la figure 235 représente cette variation. Remarquons également que U est la chute de tension dans le circuit extérieur et que le produit Ir_i est la chute de tension à l'intérieur même du générateur.

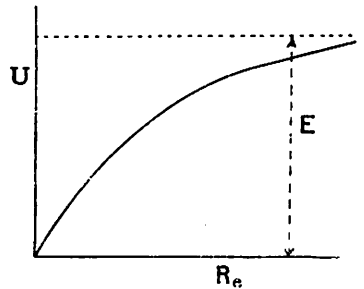


Fig. 234.

188. ASSOCIATION DES GÉNÉRATEURS. — A) **Grouperement en série.** — Dans ce genre d'association, le pôle positif du premier générateur est relié au pôle négatif du second, le pôle positif du second au pôle négatif du troisième et ainsi de suite... (fig. 236). Associations n générateurs identiques de force électromotrice E et de résistance intérieure r_i .

1^o) Supposons le circuit ouvert et le pôle négatif du premier générateur mis à la terre. Le pôle négatif du premier générateur est donc au potentiel 0 et son pôle positif au potentiel E ; le pôle négatif du second générateur est au potentiel E et son pôle positif au potentiel $E + E$ c'est-à-dire $2E$ et ainsi de suite... (n^o 166). Le pôle positif du n^{me} générateur est donc au potentiel $E + E + E + \dots$ c'est-à-dire nE .

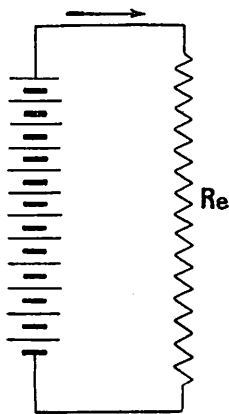


Fig. 236.

La force électromotrice du groupement est égale à la somme des forces électromotrices des générateurs.

2^o) Fermons le circuit sur une résistance extérieure R_e ; le courant doit passer dans le conducteur extérieur mais également dans chaque générateur. La résistance totale du circuit est égale à la somme des résistances; elle vaut donc : $R_e + r_i + r_i + r_i + \dots$ c'est-à-dire $R_e + nr_i$.

L'intensité du courant dans le circuit est donc (loi d'Ohm - 2^e forme) :

$$I = \frac{nE}{R_e + nr_i}$$

Ce genre d'association convient particulièrement lorsque la résistance extérieure R_e est très grande par rapport à la résistance nr_i du groupement. En effet, en négligeant nr_i , la relation précédente s'écrit : $I = nE/R_e$; l'intensité du courant est proportionnelle au nombre de générateurs groupés.

Ce groupement est réalisé dans les batteries d'accumulateurs (résistance intérieure négligeable), dans les installations des piles de sonnerie, dans la fabrication des piles de lampes de poche, etc...

B) **Groupement en parallèle.** — Dans ce genre d'association, tous les pôles de même nom sont réunis entre eux (fig. 237). Associons n générateurs identiques de force électromotrice E et de résistance interne r_i . La force électromotrice est, pour des raisons évidentes, E . En circuit fermé, le courant passe dans le circuit extérieur de résistance R_e puis dans les circuits dérivés dont la résistance est pour chacun d'eux r_i .

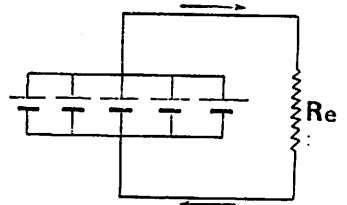


Fig. 237.

Or, la résistance équivalente R' des circuits dérivés est : r_i/n (n° 155).

L'intensité du courant dans le circuit extérieur est donc :

$$I = \frac{E}{R_e + \frac{r_i}{n}}$$

Ce genre d'association convient particulièrement lorsque la résistance extérieure R_e est très petite par rapport à la résistance du groupement. En effet, en négligeant R_e , la relation précédente s'écrit : $I = nE/r_i$; l'intensité du courant est proportionnelle au nombre de générateurs associés.

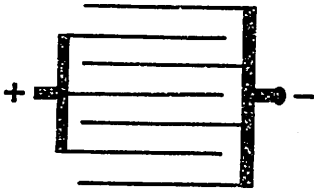


Fig. 238.

plomb (fig. 238).

Ce groupement est employé dans la construction des accumulateurs au

*C) **Groupement mixte.** — Le groupement mixte consiste à grouper les n générateurs en q séries comprenant chacun p générateurs, les séries étant reliées en parallèle (fig. 239). La force électromotrice de l'association est égale à la force électromotrice d'une série c'est-à-dire à pE . La résistance intérieure du groupement est égale à la q^{me} partie de la résistance d'une série c'est-à-dire à pr_i/q . En fermant le circuit sur un circuit extérieur de résistance R_e , l'intensité du courant dans le circuit extérieur est :

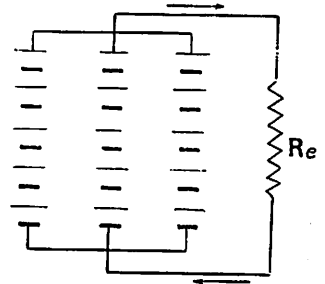


Fig. 239.

$$I = \frac{pE}{R_e + \frac{pr_i}{q}} = \frac{pqE}{qR_e + pr_i} = \frac{nE}{qR_e + pr_i}$$

Le numérateur de la fraction est constant. Le dénominateur est la somme de deux termes dont le produit est constant : $pr_i \cdot qR_e = nr_i R_e$; la somme est minimum quand les deux termes pr_i et qR_e sont égaux.

$$qR_e = pr_i \quad \text{d'où} \quad R_e = \frac{pr_i}{q}$$

L'intensité du courant dans le circuit extérieur sera maximum quand la résistance du circuit extérieur sera égale à la résistance intérieure du groupement.

189. PUISSANCE D'UN GÉNÉRATEUR. — Tout générateur, qu'il soit formé d'un seul générateur (pile, accumulateur) ou d'une association de générateurs, est caractérisé par sa force électromotrice E et par sa résistance intérieure r_i . Les considérations qui vont suivre sont valables pour tous les générateurs.

Nous savons que l'intensité du courant débité par un générateur est donnée par l'expression : $I = \frac{E}{R_e + r_i}$; que l'énergie de ce cou-

rant est intégralement dissipée par effet Joule dans la résistance extérieure et dans la résistance intérieure. L'énergie dissipée en chaleur par seconde est (n° 153) :

$$I^2 R_e + I^2 r_i = I^2 (R_e + r_i) = EI.$$

La puissance du courant et par conséquent la puissance du générateur (l'énergie étant fournie intégralement par le générateur) est donc :

$$\boxed{W = EI}$$

190. RENDEMENT D'UN GÉNÉRATEUR. — L'énergie d'un générateur se dissipe en partie dans le circuit extérieur (puissance utilisable), en partie dans le circuit intérieur (puissance inutilisable). La puissance utilisable vaut (U désignant la tension aux bornes) :

$$W' = I^2 R_e; \quad W' = UI$$

Le rendement du générateur (rapport de la puissance utilisable à la puissance totale du générateur) est donné par :

$$R^t = \frac{W'}{W}; \quad R^t = \frac{U}{E}; \quad R^t = \frac{R_e}{R_e + r_i}$$

Le rendement pour un circuit extérieur déterminé est d'autant plus élevé que la résistance du générateur est faible; le rendement pour un générateur déterminé est d'autant plus élevé que la résistance extérieure est grande c'est-à-dire que l'intensité du courant est faible.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer l'intensité du courant fourni par une pile Bunsen de force électromotrice : 1,8 V et de résistance intérieure : 0,2 Ω. La résistance extérieure est de 3,4 Ω.

SOLUTION. — Par application de la loi d'Ohm - 2^e forme, il vient

$$I = \frac{E}{R_e + r_i}; I = \frac{1,8}{3,4 + 0,2}; I = 0,5 \text{ A.}$$

2. Une pile dont les bornes sont reliées par un fil de maillechort ($\rho = 30 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$. de 0,25 mm² de section et de 5 m de longueur débite un courant de 160 mA. Lorsque la longueur du fil de maillechort est réduite de moitié, l'intensité du courant est de 300 mA. On demande la résistance intérieure et la force électromotrice de la pile.

SOLUTION. — Calculons la résistance extérieure des deux circuits :

$$R_e = \frac{30 \cdot 10^{-6} \cdot 500}{0,0025} = 6 \Omega; \quad R'_e = 6/2 = 3 \Omega.$$

Premier circuit : $E = I(R_e + r_i)$; $E = 0,160(6 + r_i)$.

Deuxième circuit : $E = I'(R'_e + r_i)$; $E = 0,300(3 + r_i)$.

D'où : $0,160(6 + r_i) = 0,300(3 + r_i)$; $r_i = 0,428 \Omega$.

La force électromotrice de la pile est :

$$E = I(R_e + r_i); E = 0,3(3 + 0,428) = 1,028 \text{ V.}$$

3. Calculer la tension aux bornes d'une pile Daniell (force électromotrice : 1,1 V; résistance intérieure : 0,5 Ω) branchée sur une résistance extérieure de 10,5 Ω.

SOLUTION. — L'intensité du courant est :

$$I = \frac{E}{R_e + r_i}; I = \frac{1,1}{10,5 + 0,5} = 0,1 \text{ A}$$

La tension aux bornes est : $U = E - Ir_i$; $U = 1,1 - 0,1 \cdot 0,5 = 1,05 \text{ V}$.

4. Une pile Leclanché (force électromotrice : 1,51 V; résistance intérieure : 1,3 Ω) débite un courant sur une résistance extérieure de 3 Ω. Calculer : a) l'intensité du courant; b) la tension aux bornes de la pile; c) la puissance du générateur; d) le rendement de la pile.

SOLUTION. — a) $I = \frac{E}{R_e + r_i}; I = \frac{1,51}{3 + 1,3} = 0,35 \text{ A}$.

b) $U = IR_e; U = 0,35 \cdot 3 = 1,05 \text{ V}$.

c) $W = EI; W = 1,51 \cdot 0,35 = 0,53 \text{ W}$.

d) $R^t = U/E; R^t = 1,05/1,51 \neq 0,7$.

5. Même problème pour un accumulateur (force électromotrice : 2 V; résistance intérieure : 0,05 Ω) que l'on a substitué à la pile. Comparer les résultats aux précédents.

SOLUTION. — a) $I = 0,655 \text{ A}$; b) $U = 1,965 \text{ V}$; c) $W = 1,31 \text{ W}$; d) $R^t = 0,9825$.

6. On dispose de quatre éléments Bunsen ($E : 1,8 \text{ V}; r_i : 0,2 \Omega$) pour lancer un courant dans une résistance de 1 Ω. Il y a trois manières de grouper ces éléments. Pour chacun de ces groupements, calculer l'intensité du courant dans le fil, la puissance et le rendement du générateur.

SOLUTION. — a) Groupement en série.

$$I = \frac{nE}{R_e + nr_i}; I = \frac{4 \cdot 1,8}{1 + 4 \cdot 0,2} = 4 \text{ A.}$$

$$W = EI; W = 4 \cdot 1,8 \cdot 4 = 28,8 \text{ W.}$$

$$R^t = \frac{U}{E}; R^t = \frac{IR_e}{E}; R^t = \frac{4 \cdot 1}{4 \cdot 0,8} = 0,55.$$

b) Groupement en parallèle :

$$I = \frac{E}{R_e + \frac{r_i}{n}}; I = \frac{1,8}{1 + \frac{0,2}{4}} = 1,71 \text{ A.}$$

$$W = EI; W = 1,8 \cdot 1,71 = 3,078 \text{ W.}$$

$$R^t = \frac{U}{E}; R^t = \frac{IR_e}{E}; R^t = \frac{1,71 \cdot 1}{1,8} = 0,95.$$

c) Groupement mixte : deux séries de deux éléments, les séries étant reliées en parallèle.

$$I = \frac{nE}{qR_e + pr_i}; I = \frac{4 \cdot 1,8}{2 \cdot 1 + 2 \cdot 0,2} = 3 \text{ A.}$$

$$W = EI; W = 2 \cdot 1,8 \cdot 3 = 10,8 \text{ W.}$$

$$R^t = \frac{U}{E}; R^t = \frac{IR_e}{E}; R^t = \frac{3 \cdot 1}{3,6} = 0,83.$$

2. CIRCUIT A GÉNÉRATEUR ET RÉCEPTEUR.

191. GÉNÉRATEURS EN OPPOSITION. — Considérons un circuit constitué par un fil de résistance R_e réunissant les bornes positives de deux générateurs de forces électromotrices E et E' ($E > E'$) et de résistances internes r_i et r'_i , et par un fil de résistance

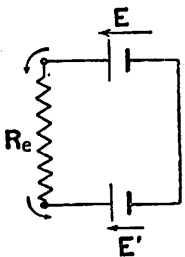


Fig. 240.

négligeable réunissant les bornes négatives de ces deux générateurs (fig. 240). A **circuit ouvert**, les bornes négatives étant mises à la terre, la borne positive du premier générateur est au potentiel E et la borne positive du second générateur est au potentiel E' ; la force électromotrice du groupement formé par les deux générateurs, qui sont dits **en opposition**, est donc égale à la différence $E - E'$. A **circuit fermé**, l'intensité I du courant, la résistance totale du circuit étant égale à la somme $R_e + r_i + r'_i$, est donnée, en application de la loi d'Ohm - 2^e forme, par la relation :

$$I = \frac{E - E'}{R_e + r_i + r'_i}$$

Le sens du courant est commandé par le générateur qui a la plus grande force électromotrice.

Analogie hydraulique. — Cette association est comparable à l'association de deux pompes P et P' qui tendraient à faire circuler l'eau dans une canalisation en sens inverse l'une de l'autre (fig. 241). C'est la pompe la plus puissante P qui commande le sens du courant liquide, lequel est beaucoup moins fort que si la pompe P travaillait seule.

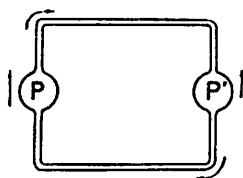


Fig. 241.

192. LOI D'OHM — 3^e FORME. — Considérons un circuit simple comprenant un générateur G (force électromotrice : E; résistance interne : r_i) relié par des fils de résistance R_e à un voltamètre à eau acidulée de résistance r'_i (fig. 242). L'intensité I du courant dans le circuit est inférieure à celle prévue par la loi d'Ohm - 2^e forme :

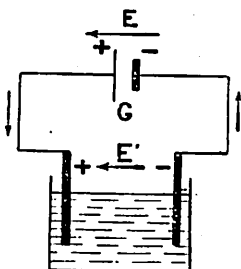


Fig. 242.

$$I < \frac{E}{R_e + r_i + r'_i}$$

En effet, nous savons que le passage du courant dans le voltamètre modifie les électrodes et crée une force électromotrice de polarisation. Le voltamètre se transforme en générateur dont la borne positive est constituée par l'anode (O_2) et la borne négative par la cathode (H_2) : il fonctionne donc comme générateur en opposition avec le générateur G. La force électromotrice du voltamètre qui est en opposition avec la force électromotrice du générateur est appelée **force contre-électromotrice** que nous désignerons par la lettre E'.

Cette force contre-électromotrice apparaît dans les appareils d'électrolyse dont les électrodes sont rendues dissymétriques par le passage du courant ainsi que dans les moteurs électriques c'est-à-dire, d'une façon générale, dans les récepteurs électriques.

Énoncé de la loi d'Ohm - 3^e forme. — L'intensité du courant dans un circuit comprenant un générateur et un récepteur est égale au quotient de la différence de la force électromotrice du générateur et de la force contre-électromotrice du récepteur par la résistance totale du circuit.

$$I = \frac{E - E'}{R_e + r_i + r'_i}$$

193. PUISSANCE CONSOMMÉE DANS UN RÉCEPTEUR.

— L'énergie électrique fournie par le générateur au récepteur s'y transforme partiellement en chaleur (effet Joule), partiellement en énergie chimique (voltamètre) ou en énergie mécanique (moteur).

L'énergie fournie par seconde par le générateur est :

$$W = EI$$

L'énergie dégagée par seconde sous forme de chaleur dans tout le circuit est :

$$W' = I^2(R_e + r_i + r'_i)$$

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, la puissance utile consommée dans le récepteur est donc :

$$W'' = W - W' = EI - I^2(R_e + r_i + r'_i) = EI - (E - E')I = E'I.$$

La puissance utile consommée par le récepteur est égale au produit de la force contre-électromotrice de ce récepteur par l'intensité du courant.

$$W'' = E'I$$

194. TENSION ET FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE.

— Quelle est la tension U aux bornes d'un récepteur de force contre-électromotrice E' parcouru par un courant d'intensité I ?

Remarquons que l'énergie électrique totale absorbée par seconde par le récepteur est : UI (n° 152); que la fraction $I^2r'_i$ se dissipe en chaleur et que la fraction $E'I$ est transformée en énergie chimique ou mécanique. Il s'ensuit :

$$UI = E'I + I^2r'_i \quad \text{et} \quad U = E' + Ir'_i.$$

Le produit Ir'_i représente la chute de tension dans le récepteur c'est-à-dire la tension nécessaire pour donner un courant d'intensité I si le récepteur ne présentait pas de force contre-électromotrice.

$$U - E$$

Conséquences. — La formule mise sous la forme : $I = \frac{U - E}{r'_i}$

montre que, pour qu'un courant circule dans le récepteur, il faut que la tension U soit supérieure à la force contre-électromotrice E' . C'est la raison pour laquelle il faut, pour qu'il y ait électrolyse dans les voltamètres dont les électrodes subissent des modifications, appliquer aux bornes de l'électrolyseur une tension plus grande que la force contre-électromotrice qui y est créée (1,5 volt pour l'eau acidulée). La charge des accumulateurs exige toujours une tension plus grande que la force contre-électromotrice, sinon ($E' > U$) les accumulateurs fourniraient le courant et, par conséquent, se déchargeraient.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. On groupe en opposition une pile Poggendorf (force électromotrice : 2 V, résistance intérieure : 0,2 Ω) avec une pile Leclanché (force électromotrice : 1,5 V; résistance intérieure : 1,2 Ω). Calculer l'intensité du courant sachant que la résistance extérieure est de 1,1 Ω .

SOLUTION. — L'intensité du courant est

$$I = \frac{E - E'}{R_e + r_i + r'_i}; I = \frac{2 - 1,5}{1,1 + 0,2 + 1,2} = 0,2 \text{ A.}$$

2. On veut charger une batterie de 30 accumulateurs ($E : 2 \text{ V}; r_i = 0,01 \Omega$) au régime de 12 A. On dispose d'une tension de 90 V. a) Comment faut-il faire le montage et quelle résistance faut-il intercaler pendant la charge et à la fin de la charge ($E : 2,5 \text{ V}$) ? b) Quelle est la puissance absorbée par les accumulateurs au début de la charge ? c) Quel est le rendement énergétique de l'opération ?

SOLUTION. — a) Le montage se fait en série.

La résistance R_e à intercaler est obtenue à partir de la relation : $I = \frac{E - E'}{R_e + r_i + r'_i}$; au début de la charge, elle est de $2,2 \Omega$; à la fin de la charge, elle est de $0,95 \Omega$.

b) La puissance absorbée au début de la charge est :

$$W'' = E'I; W'' = 60 \cdot 12 = 720 \text{ W.}$$

c) La puissance fournie est : $W = UI; W = 90 \cdot 12 = 1\,080 \text{ W.}$

Le rendement énergétique est donc : $R^l = \frac{W''}{W}; R^l = \frac{720}{1\,080} = \frac{2}{3}$.

§ 7. PASSAGE DU COURANT DANS LES GAZ.

Nous limiterons notre étude sur cette importante question aux phénomènes qui ont puissamment contribué à élucider le problème de la constitution de la matière. L'étude du passage du courant dans

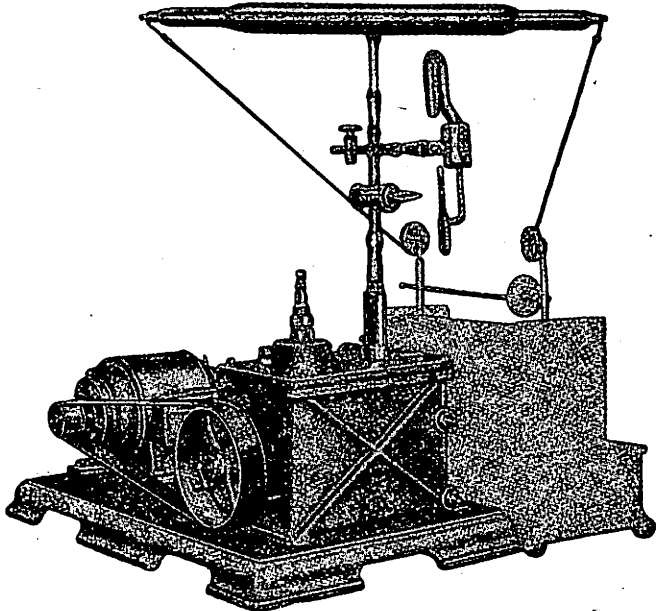


Fig. 243.

les gaz nécessite l'emploi de fortes tensions qui sont fournies par la machine de Wimshurst ou mieux par la bobine de Ruhmkorff et d'un vide poussé qui est produit par une bonne pompe à vide (fig. 243).

195. DÉCHARGE DISRUPTIVE DANS LES GAZ SOUMIS A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE. — Dans les conditions ordinaires de pression et de température, les gaz, soustraits à des influences ionisantes (lumière, rayons X, radium), se comportent comme des isolants. Cependant, pour une tension suffisamment élevée, appelée **tension de disruption**, le gaz devient brusquement conducteur : le courant passe sous forme d'une étincelle bruyante.

La tension de disruption dépend, entre autre, de la forme des électrodes et de la distance qui les sépare. Le tableau suivant indique la tension de disruption pour l'air aux conditions ordinaires de pression et de température.

Tensions de disruption (Air).

Distances entre électrodes	Formes des électrodes			
	Sphères (2 cm de diamètre)	Plateaux indéfinis	Disques (5 cm de diamètre)	Pointes
0,1 cm	4 780 V			
1 cm	25 000 V	31 300 V	32 300 V	
5 cm	45 000 V	134 500 V	106 000 V	42 500 V
10 cm	56 000 V	264 000 V	142 500 V	57 000 V
12 cm	59 000 V	315 800 V	153 000 V	59 500 V

On admet qu'il y a toujours dans le gaz séparant les électrodes quelques particules électrisées : électrons, ions négatifs, ions positifs. Lors de l'application d'une tension aux électrodes, les particules électrisées négativement se mettent en mouvement vers l'électrode positive et les particules électrisées positivement se mettent en mouvement vers l'électrode négative. La vitesse qu'acquièrent ces particules électrisées est fonction de la tension appliquée aux électrodes. A partir d'une certaine valeur de cette tension, les particules électrisées atteignent une vitesse (vitesse critique d'ionisation) telle que l'énergie cinétique dont elles sont douées est suffisante pour briser les atomes du gaz avec lesquels elles entrent en collision. Sous l'effet du choc, les atomes du gaz perdent un ou plusieurs électrons : il y a donc production d'un grand nombre de particules électrisées : électrons, ions négatifs, ions positifs. C'est le phénomène de l'ionisation du gaz. Toutes ces particules électrisées se précipitent sur les électrodes pour y libérer leur charge. Lorsque les particules électrisées produites par l'ionisation ont été balayées, le gaz a repris ses propriétés isolantes.

1)

196. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA TENSION DE DISRUPTION. — Lorsqu'on diminue la pression du gaz, la tension de disruption diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur minimum. Pour l'air, ce minimum se produit pour une pression de quelques dixièmes de millimètre de mercure. Lorsqu'on pousse la raréfaction, la tension de disruption augmente très rapidement. Au vide absolu, quelle que soit la tension appliquée aux électrodes, la décharge ne se produit plus : le vide absolu est un isolant parfait.

197. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR L'ASPECT DE LA DÉCHARGE. — A la pression atmosphérique, la décharge affecte l'aspect d'un trait de feu rectiligne, ramifié ou sinueux à mesure que la distance entre électrodes augmente (fig. 244).

Si les électrodes sont trop éloignées l'une de l'autre pour que le trait de feu soit continu, la décharge prend la forme d'aigrettes : une houppe brillante et courte à l'électrode négative, une aigrette longue et très ramifiée à l'électrode positive.

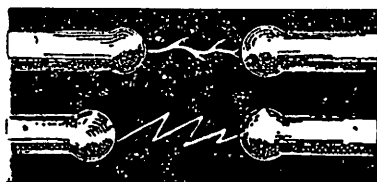


Fig. 244.

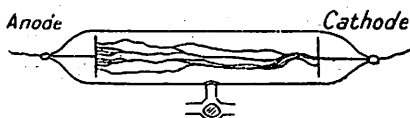


Fig. 245.

Faisons progressivement le vide dans un long tube muni d'électrodes reliées aux bornes d'une bobine de Ruhmkorff (fig. 245). L'aspect de la décharge se modifie progressivement. Le trait lumineux s'élargit en une colonne lumineuse (pression d'un quart d'atmosphère) (fig. 246). Cette colonne lumineuse ne tarde pas à envahir tout le tube (pression de quelques centimètres de mercure). A la pression d'un ou deux millimètres de mercure (vide de Geissler) s'observe le phénomène des lueurs : le gaz devient lumineux et la couleur de la lumière émise dépend de la nature du gaz résiduel : rose pour l'air, bleu pour l'hydrogène, rouge pour le néon (tubes des réclames lumineuses). A cette pression, l'aspect de la décharge est vraiment remarquable : la lueur émise par l'anode (lumière anodique) est formée de tranches lumineuses appelées strates; la lueur émise par la cathode (lumière cathodique) est violacée; un espace obscur (espace obscur de Faraday) de faible étendue sépare la lumière anodique

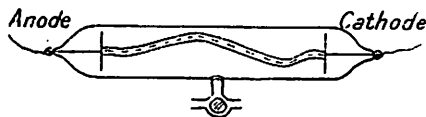


Fig. 246.

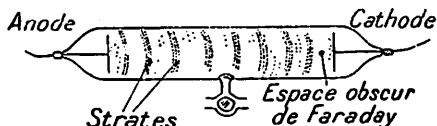


Fig. 247.

obscur de Faraday) de faible étendue sépare la lumière anodique

de la lumière cathodique (fig. 247) A la pression de l'ordre d'un dixième de millimètre de mercure, la lumière anodique se retire vers l'anode, la lumière cathodique se détache de la cathode

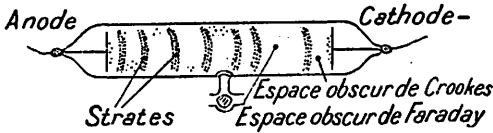


Fig. 248.

dont elle est séparée par un nouvel espace obscur (espace obscur de Crookes) (fig. 248). Enfin, si la pression diminue encore, les lueurs s'affaiblissent

progressivement en même temps que l'espace obscur de Crookes envahit le tube. A la pression d'un millième de millimètre de mercure (vide de Crookes), le tube est complètement obscur mais la paroi de verre, qui fait face à la cathode, s'illumine en vert jaunâtre. Cette fluorescence est causée par un rayonnement qui, issu de la cathode, est appelé rayonnement cathodique.

Lorsque nous appliquons une différence de potentiel aux électrodes d'un tube à gaz raréfié, les électrons et les ions positifs provenant de l'ionisation du gaz se mettent en mouvement : les premiers vers l'anode, les seconds vers la cathode.

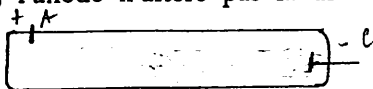
Les ions positifs, à cause de leur masse relativement grande n'atteignent la vitesse critique d'ionisation qu'aux abords immédiats de la cathode. L'ionisation intense qui s'y produit détermine la lumière cathodique. Les électrons provenant de cette ionisation, à cause de leur masse excessivement petite, atteignent rapidement une vitesse suffisante pour ioniser les molécules gazeuses; il y a production d'une tranche lumineuse que nous avons appelée strate. Les électrons provenant de cette nouvelle ionisation produisent un nouveau strate et ainsi de suite. Ces électrons produisent aux environs immédiats de l'anode une ionisation intense qui détermine la lumière anodique.

198. RAYONS CATHODIQUES. — Les rayons cathodiques dont l'étude est due à Hittorf (physicien allemand), à Crookes (physicien et chimiste anglais : 1832-1919), à Perrin (physicien français : 1870-1942),... s'observent facilement dans des ampoules où règne un vide très poussé (ampoules de Crookes).

1°) Les rayons cathodiques produisent la luminescence d'un grand nombre de substances.

Des substances disposées sur le trajet des rayons cathodiques s'illuminent: le verre en vert jaunâtre, la craie en jaune orangé, le rubis en rouge, le diamant en vert,... (fig. 249).

2°) Les rayons cathodiques sont émis normalement à la surface de la cathode et se propagent en ligne droite. Quel que soit l'endroit de l'ampoule où elle est située, l'anode n'altère pas la direction du faisceau cathodique.



à l'heure
des qu'ils
sur la paroi
au cathode.
l'ionisation
à l'heure.

Une croix en aluminium disposée devant la cathode détermine, sur la paroi

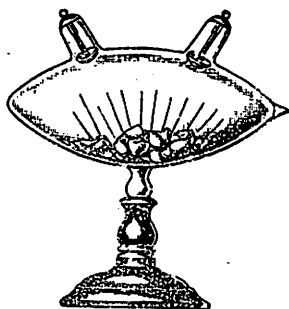


Fig. 249.

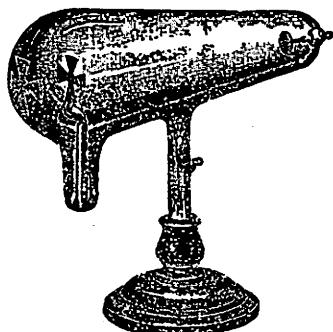


Fig. 250.

qui y fait face, une croix d'ombre très nette tranchant sur le fond fluorescent (fig. 250).

2o) Les rayons cathodiques produisent des effets calorifiques et mécaniques.

Une lame de platine placée au foyer d'une cathode concave devient incandescente. Un moulinet en mica disposé sur le trajet des rayons cathodiques s'éloigne de la cathode (fig. 251).

3o) Les rayons cathodiques sont formés de particules chargées d'électricité négative.

Un cylindre d'aluminium A relié à un électroscope E est disposé dans une ampoule face à la cathode (fig. 252). Ce cylindre est entouré d'un écran C (toile métallique) relié à la terre. Le cylindre A

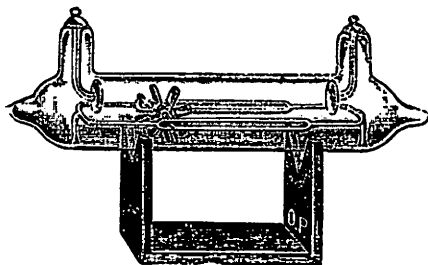


Fig. 251.

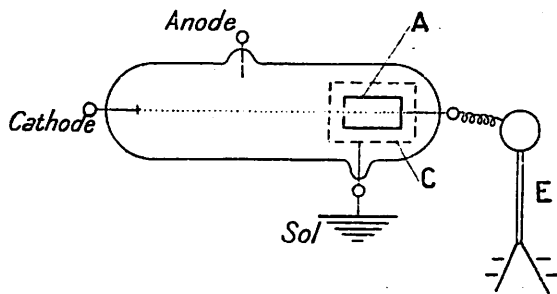


Fig. 252.

est donc protégé contre tout phénomène d'influence (n° 122). Pendant le passage de la décharge, l'électroscope se charge négativement : les rayons cathodiques sont donc chargés d'électricité négative. Cette expérience est due à Perrin.

5°) Les rayons cathodiques sont déviés par un champ électrique.

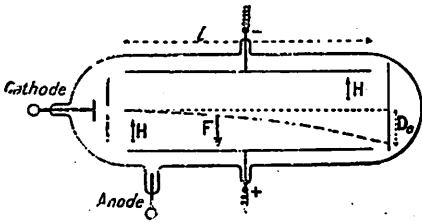


Fig. 253.

Faisons passer la décharge dans un tube dans lequel un écran en mica, disposé au voisinage de la cathode, permet d'obtenir un faisceau étroit de rayons cathodiques. Relions les plateaux dont est muni le tube aux deux pôles d'une batterie électrique. Nous observons que le point d'impact du mince faisceau cathodique s'est déplacé vers le plateau chargé positivement (fig. 253).

6°) Les rayons cathodiques sont déviés par un champ magnétique.

Approchons un aimant d'un tube semblable à celui de l'expérience précédente; nous observons que le point d'impact du mince faisceau cathodique s'est déplacé perpendiculairement à la direction du champ magnétique produit par l'aimant.

Toutes ces expériences montrent que les rayons cathodiques sont constitués de particules chargées d'électricité négative. *(Les rayons cathodiques sont constitués de particules chargées d'électricité négative.)*

*199. RAPPORT e/m DE LA PARTICULE CATHODIQUE.

Désignons respectivement par e , m , v , la charge, la masse, la vitesse de la particule cathodique.

1°) **Déviations par un champ électrique uniforme H .** — La particule cathodique passant entre les plateaux chargés qui produisent le champ H est soumise à l'action d'une force constante F égale à He (n° 102) sur toute la longueur l des plateaux. Elle participe donc à deux mouvements simultanés : l'un uniforme et l'autre uniformément accéléré. La déviation D_e subie par la

particule cathodique est donnée par la relation $D_e = \frac{at^2}{2}$. Or, l'accélération a

vaut : $a = \frac{He}{m}$ (Tome I, n° 54). La déviation D_e est donc : $D_e = \frac{Het^2}{2m}$.

D'autre part, le temps t pendant lequel la particule cathodique a été soumise à l'action du champ vaut : $t = \frac{l}{v}$. Donc, la déviation D_e subie par la particule cathodique est :

$$D_e = \frac{Hl^2}{2v^2} \frac{e}{m} \quad (1)$$

Cette relation comporte deux inconnues : le rapport e/m de la charge à la masse de la particule cathodique et la vitesse v de cette particule.

2°) **Déviations par un champ magnétique uniforme H .** — Nous verrons en Electromagnétisme qu'un champ magnétique uniforme H exerce sur un courant électrique d'intensité I une force F définie par la relation $F = HI$ (n° 242). La force qui agit sur la particule cathodique est : $F = Hev$.

La déviation D_m subie par la particule cathodique se calcule comme la déviation D_e dans un champ électrostatique. Nous obtenons :

$$D_m = \frac{Hl^2 \frac{e}{m}}{2v} \quad (2)$$

3°) **Vitesse des particules cathodiques.** — En combinant les relations (1) et (2), nous obtenons la vitesse des particules cathodiques :

$$v = \frac{D_m}{D_e} \cdot \frac{H}{H} \quad (3)$$

La vitesse des particules cathodiques varie entre 30 000 et 200 000 km/s selon la tension appliquée aux électrodes.

4°) **Rapport e/m des particules cathodiques.** — Les relations (1) et (2) nous fournissent également le rapport e/m de la charge à la masse de la particule cathodique :

$$\frac{e}{m} = \frac{D_m^2}{D_e} \cdot \frac{2H}{H^2 l^2} \quad (4)$$

On a trouvé que le rapport e/m de la charge (exprimée en coulombs) à la masse (exprimée en grammes) de la particule cathodique est égal à $176 \cdot 10^6$, quelle que soit la nature des électrodes et du gaz résiduel contenu dans le tube (1). Or, les lois de l'électrolyse nous apprennent que 96 500 coulombs libèrent 1 gramme d'hydrogène c'est-à-dire que le rapport e/m d'un ion hydrogène est égal à 96 500. Le rapport e/m d'une particule cathodique est donc 1 835 fois plus grand que le rapport e/m d'un ion hydrogène.

***200. MESURE DE LA CHARGE e .** — La charge e peut se déterminer expérimentalement de différentes façons. Nous n'exposerons que l'expérience due à Millikan (physicien américain : 1868).

Un brouillard constitué de petites sphères liquides est obtenu, par pulvérisation d'huile, dans la chambre surplombant le condensateur CC' (fig. 254). Quelques gouttelettes pénètrent,

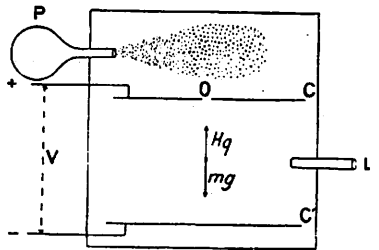


Fig. 254.

(1) Lorsque les particules cathodiques sont animées de très grandes vitesses c'est-à-dire de vitesses voisines de la vitesse de la lumière, les relations qui donnent e/m et v ne peuvent leur être appliquées sans avoir été modifiées selon la mécanique relativiste. Selon les conceptions nouvelles la masse d'un corps varie en fonction de sa vitesse suivant la relation :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

m_0 : masse au repos; m : masse à la vitesse v ; c : vitesse de la lumière.

par l'ouverture O aménagée dans le plateau C, dans la chambre limitée par les plateaux C et C' du condensateur. Ces gouttelettes, éclairées latéralement par une source lumineuse puissante, apparaissent sous forme de points brillants dans le champ de la lunette L. Ces gouttelettes, à cause de la résistance de l'air, tombent d'un mouvement uniforme de vitesse très faible (Tome I, n° 91). La vitesse de chute v d'une de ces gouttelettes, que l'on détermine en la suivant à l'aide de la lunette, est proportionnelle à son poids mg . La détermination de la vitesse de chute permet de calculer la masse m de la gouttelette. On charge ensuite les plateaux du condensateur : on crée un champ électrique H dont la valeur $H = U/d$ (n° 101) est connue. La gouttelette, qui est presque toujours électrisée soit par la pulvérisation, soit par la captation d'un ion errant, est alors soumise à deux forces : le poids mg et la force électrique Hq (q désignant la charge de la gouttelette exprimée en unités électrostatiques). On établit un champ tel que la force électrique Hq , dirigée vers le haut, équilibre le poids mg : la gouttelette s'immobilise. La charge de la gouttelette q se calcule aisément :

$$Hq = mg$$

$$q = m \frac{g}{H}$$

Millikan a toujours trouvé que la charge q des gouttelettes d'huile est, d'après les mesures les plus récentes, égale à $4,774 \cdot 10^{-10} \text{ u e s}$ ou à un multiple exact de $4,774 \cdot 10^{-10} \text{ u e s}$.

Le granule d'électricité c'est-à-dire l'électron a , d'après les mesures les plus récentes, une charge égale à $4,774 \cdot 10^{-10} \text{ u e s}$ de charge.

201. ÉLECTRON. — Les rayons cathodiques sont constitués d'électrons dont la charge vaut :

$$e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ u e s de charge}$$

$$\text{ou } 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C,}$$

dont la masse vaut (cette masse peut être déterminée puisque nous connaissons le rapport e/m et la charge e) :

$$m = 9,1 \cdot 10^{-28} \text{ g,}$$

dont le rayon est :

$$r = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

L'électron, que nous rencontrerons dans un grand nombre de phénomènes différents, est un **constituant universel de la matière.**

202. RAYONS CANAUX. — Provoquons la décharge électrique dans une ampoule de Crookes à cathode criblée. Nous observons que des faisceaux de rayons colorés parallèles sortent des trous aménagés dans la cathode et se propagent dans la région de l'ampoule située en arrière de la cathode

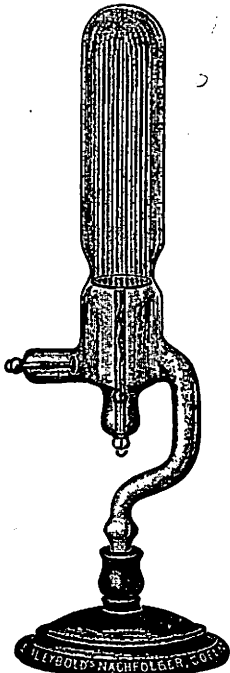


Fig. 255.

(fig. 255). Ces rayons constituent les **rayons canaux.**

Par des expériences analogues à celles que nous avons décrites

$F = ma$
 $m = \frac{F}{a}$
 $\frac{1}{1840} \text{ em}$
 $m \cdot H$

pour les rayons cathodiques, on a montré que les rayons canaux sont déviés en sens inverse des rayons cathodiques par un champ électrique et par un champ magnétique : ils sont donc formés de particules chargées d'électricité positive. La mesure des déviations subies par la particule constitutive des rayons canaux lors de son passage dans un champ électrique et dans un champ magnétique a permis de déterminer la vitesse, la charge et la masse de cette particule. On a trouvé que sa vitesse est d'environ 4 000 km/s, que sa masse est égale à la masse atomique ou à un multiple de la masse atomique du gaz résiduel, que sa charge est égale à e ou à un multiple de e .

203. RAYONS X. — Les rayons X découverts en 1895 par

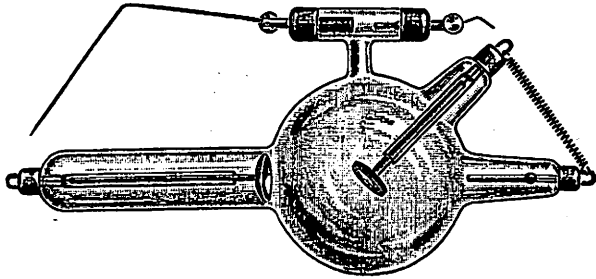


Fig. 256.

Röntgen (physicien allemand : 1845-1923) prennent naissance lors de la rencontre des rayons cathodiques avec un obstacle. Pour la production des rayons X, on utilise des ampoules de Crookes appelées tubes-focus (fig. 256). Au foyer d'une cathode concave se trouve un disque de platine ou de tungstène qui constitue l'anticathode. Cette anticathode est disposée de telle manière que les rayons cathodiques y tombent sous une inclinaison de 45°. Sous l'action des rayons cathodiques, l'anticathode émet des rayons X dans toutes les directions (fig. 257).

1^o) Les rayons X se propagent en ligne droite; ils ne sont déviés ni par un champ électrique, ni par un champ magnétique : ils ne sont donc pas porteurs de charges électriques.

2^o) Les rayons X provoquent la luminescence de certaines substances.

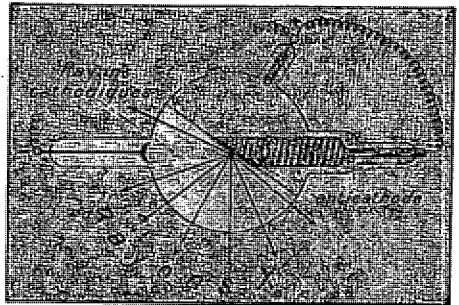


Fig. 257.

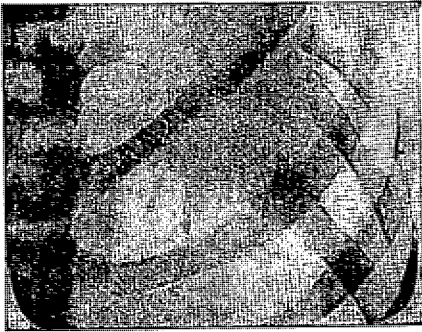
Le plan passant par l'anticathode divise le tube-focus en deux régions : l'une, dont le verre reste obscur ; l'autre, dont le verre est fluorescent. La

luminescence du platino-cyanure de baryum est particulièrement remarquable : un écran recouvert par cette substance est utilisé pour la détection des rayons X.

3° Les rayons X ont un pouvoir de pénétration élevé.

Disposons à quelque distance du tube-focus un écran recouvert de platino-cyanure de baryum. L'écran manifeste une vive luminescence verte : les rayons X ne sont guère absorbés par l'air et par le verre. Interposons entre l'écran et le tube : a) une feuille de papier : l'écran reste luminescent ; b) une lame de bois : la luminescence de l'écran perd de son intensité ; c) une lame de plomb : l'écran perd toute luminescence. L'absorption des rayons X par la matière dépend donc de la densité de celle-ci. Si nous interposons la main entre l'écran et le tube, les rayons X sont arrêtés partiellement par les chairs, totalement par les os : le squelette de la main est projeté sur l'écran (radioscopie).

4° Les rayons X impressionnent la plaque photographique.



Disposons face à l'antithode une plaque photographique enveloppée de papier noir ; nous constatons, après développement, que la plaque photographique est impressionnée. Si nous interposons le corps entre la plaque et le tube, nous obtenons, après développement et fixation, l'image de son squelette (radiographie) (fig. 258).

5° Les rayons X ionisent l'air.

Fig. 258. Amenons sur le trajet des rayons X un corps électrisé ; ce corps est ramené à l'état neutre.

L'étude des rayons X a montré qu'ils sont de même nature que la lumière. *avec une plus gr. fréquence.* 1) traversent les hu 2) ne sont pas réfléchies

§ 8. PHÉNOMÈNES ÉLECTRONIQUES.

1. ÉMISSION THERMO-ÉLECTRONIQUE.

204. EFFET THERMO-ÉLECTRONIQUE. — Un électroscope chargé se décharge lorsque nous en approchons une tige de fer portée au rouge. *E. d'iron*

Dans une ampoule parfaitement vide de tout gaz sont fixés, se faisant face, un filament de tungstène F et une plaque métallique P (fig. 259). Le filament est porté au rouge par le courant débité par une batterie d'accumulateurs de 4 volts (batterie de chauffage). La plaque métallique P est reliée au pôle positif d'une batterie d'accumu-

lateurs de 40 volts (batterie haute-tension) et le filament de tungstène F est relié au pôle négatif de la même batterie. Le galvanomètre G disposé dans le circuit plaque-filament accuse un courant. Intervenons les connexions de la plaque et du filament avec la batterie haute-tension. Le galvanomètre n'accuse plus le moindre courant. Les particules électrisées émises par le filament chauffé sont donc négatives. Ces particules électrisées sont attirées par la plaque métallique P lorsqu'elle est portée à un potentiel supérieur à celui du filament.

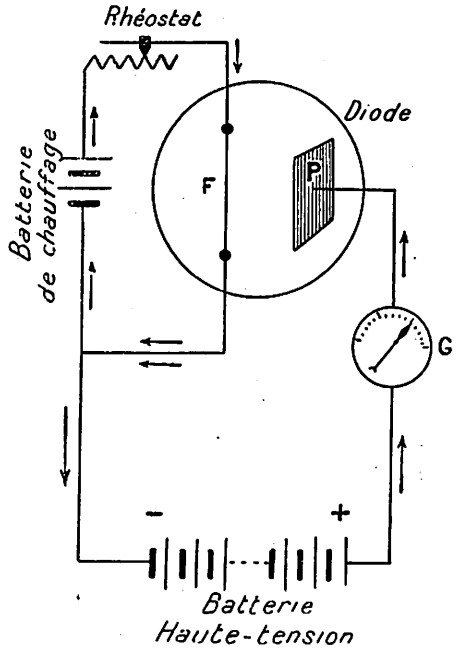


Fig. 259.

L'analyse a montré que les particules électrisées émises par les métaux chauffés sont des électrons. L'émission thermique des électrons serait en quelque sorte une évaporation des électrons libres du métal.

205. LOIS DE L'ÉMISSION THERMO-ÉLECTRONIQUE.

— 1^o) L'intensité du courant de plaque c'est-à-dire du courant qui passe dans le circuit plaque-filament augmente en fonction du potentiel auquel est portée la plaque pour atteindre une valeur limite (fig. 260).

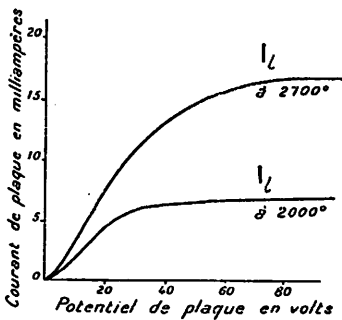


Fig. 260.

On s'en rend compte aisément en augmentant le nombre d'éléments de la batterie haute-tension. On peut d'ailleurs prévoir cette loi : à mesure que s'élève le potentiel de la plaque P, le nombre et la vitesse des électrons attirés par la plaque augmentent; cependant, lorsque tous les électrons émis par

le filament sont captés par l'anode au fur et à mesure de leur émission, le courant a évidemment atteint une intensité maximum I_L . Ce courant d'intensité maximum est connu sous le nom de **courant de saturation**.

2°) L'intensité du courant de saturation croît en fonction de la température du métal radiant (fig. 260).

On s'en rend aisément compte en augmentant, par la manœuvre du rhéostat, l'intensité du courant de chauffage et, par conséquent, la température du filament de tungstène.

L'appareil que nous venons de décrire et qui est appelé **kénotron** ou **diode** est à la base de la radioélectricité.

2. ÉMISSION PHOTO-ÉLECTRONIQUE.

206. EFFET PHOTO-ÉLECTRONIQUE. — La paroi d'une ampoule en verre, parfaitement vide d'air, est partiellement recouverte de potassium et est traversée par un filament de platine (fig. 261). Relions le potassium à la borne négative d'une batterie d'accu-

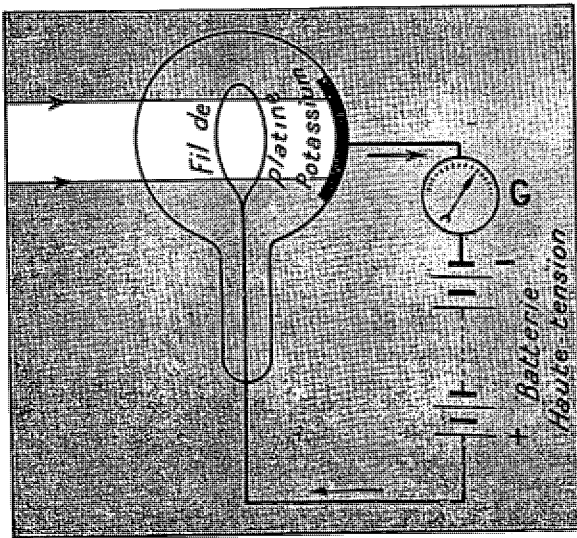


Fig. 261.

mulateurs et le fil de platine à la borne positive. A l'obscurité, le galvanomètre branché sur le circuit n'accuse aucun courant. Envoyons sur le potassium un faisceau de lumière, le galvanomètre accuse un courant dont l'intensité (quelques micro-ampères) croît en fonction de l'intensité de la lumière reçue par le potassium et de la fréquence de la radiation constituant cette lumière (n° 432). Sous l'action de la lumière, le potassium émet des électrons qui sont attirés et captés par la platine (anode).

L'appareil que nous venons de décrire constitue la **cellule photo-électrique**. Outre l'intérêt théorique énorme du phénomène photo-électronique, la cellule photo-électrique est à la base de la télévision (n° 393), de la téléphotographie, de la sonorisation du cinéma (n° 396).

3. RADIOACTIVITÉ.

207. RADIOACTIVITÉ. — En 1896, H. Becquerel (chimiste français : 1852-1908) observait qu'un sel d'uranium est capable d'impressionner fortement une plaque photographique, même garantie par une feuille d'aluminium. Il montra que les radiations émises par le sel d'uranium appartiennent en propre à l'atome uranium. En 1898-1899, les Curie (Curie, physicien français : 1859-1906; Madame Curie, chimiste française : 1867-1936) isolèrent des corps plus actifs que l'uranium : le polonium, le radium, l'actinium. Les rayonnements émis par ces substances dites radioactives se composent des rayons α , des rayons β et des rayons γ (fig. 262).

1^o) Les rayons α sont constitués d'atomes d'hélium privés de deux électrons, chargés par conséquent positivement et animés d'une vitesse de 14 000 à 20 000 km/s. Leur pouvoir de pénétration est faible : une feuille de papier suffit pour les arrêter. Les rayons α peuvent être assimilés aux rayons canaux.

2^o) Les rayons β sont constitués d'électrons animés d'une vitesse de 100 000 à 290 000 km/s. Leur pouvoir de pénétration est assez élevé (7 cm de plomb). Les rayons β sont analogues aux rayons cathodiques.

3^o) Les rayons γ ne sont déviés ni par un champ électrique, ni par un champ magnétique. Ils sont de même nature que les rayons X mais ils sont plus pénétrants que ces derniers. Les rayons γ accompagnent souvent les rayons β .

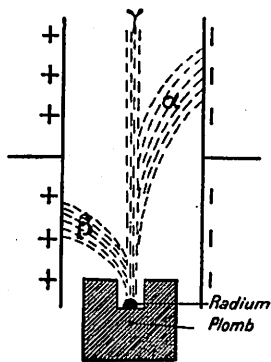


Fig. 262

§ 9. CONSTITUTION DE LA MATIÈRE (1).

208. CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS. — En rangeant les éléments selon leur masse atomique, Mendelejeff (chimiste russe : 1834-1907) observa en 1873 une périodicité très nette dans leurs propriétés chimiques et physiques (fonction, valence, densité, température de fusion, température d'ébullition, conductibilité électrique,...).

Le dixième élément ressemble au deuxième, le onzième ressemble au troisième, le douzième ressemble au quatrième et ainsi de suite. La figure 263 montre les vingt-deux premiers éléments classés sur une spirale s'enroulant autour d'un prisme octogonal. Remarquons que l'hydrogène occupe une place spéciale; que les éléments semblables se trouvent sur la même arête du

(1) Voir « Cours de Chimie », par Jodogne et Dessart, n^{os} 418 à 420 et 425 à 439.

prisme : groupe des gaz rares (valence 0), groupe des métaux alcalins

(valence 1), groupe des métaux alcalino-terreux (valence 2),... Au delà du vingt-deuxième élément, la périodicité est plus compliquée. Dans sa classification, Mendelejeff attribue aux éléments un numéro d'ordre appelé nombre atomique : 1 pour l'hydrogène, 2 pour l'hélium, 3 pour le lithium, 4 pour le glucinium,... 92 pour l'uranium.

La signification du nombre atomique ne fut découverte que plus tard : ce nombre indique à la fois le nombre de charges positives du noyau et le nombre d'électrons planétaires de l'atome (n° 210). Dans la figure 263, le nombre qui précède le symbole de

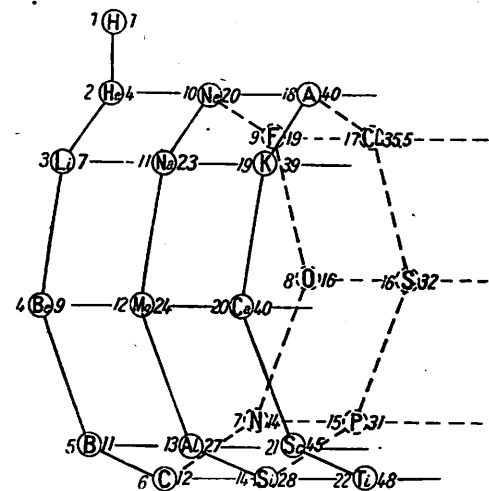


Fig. 263.

l'élément en indique le nombre atomique, le nombre qui suit le symbole de l'élément en indique la masse atomique.

209. ATOME D'HYDROGÈNE (fig. 264). — Selon nos conceptions actuelles, l'atome d'hydrogène, le plus simple de tous les atomes, est constitué d'un noyau central très petit, concentrant toute la masse de l'atome et portant une charge électrique positive équivalente à la charge de l'électron. Ce noyau appelé **proton** (du grec protos : primordial) est le granule d'électricité positive. Ce proton est, comme l'électron, un constituant universel de la matière. Le rayon du proton serait de $1,4 \cdot 10^{-13}$ cm. La masse du proton est 1835 fois plus grande que la masse de l'électron.

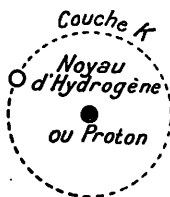


Fig. 264.

Un électron de masse négligeable gravite autour du noyau sur une orbite dont le rayon est très grand par rapport au diamètre du noyau. L'atome est donc extrêmement lacunaire. L'atome H privé de son électron constitue l'ion H^+ .

210. STRUCTURE DES ATOMES. — Considérons un élément de masse atomique M et de nombre atomique N. L'atome de cet élément comporterait :

1°) Un noyau central dont la masse est égale à M fois la masse du proton et dont la charge est égale à N fois la charge du proton.

2°) Des électrons gravitant autour du noyau et appelés **électrons planétaires**. Le nombre des électrons planétaires est égal à N , la charge totale des électrons planétaires est $-Ne$. L'atome est donc électriquement neutre. Les électrons planétaires sont répartis en couches successives désignées par les lettres K, L, M, N, O, P . La couche K est saturée avec 2 électrons, la couche L avec 8 électrons, la couche M avec 8 électrons...

Exemples. — 1°) **Hélium** ($N : 2 ; M : 4$). Noyau ; 2 électrons planétaires : couche K (fig. 265). Le noyau de l'hélium constitue la particule α .

2°) **Carbone** ($N : 6 ; M : 12$). Noyau ; 6 électrons planétaires : 2 sur couche K , 4 sur la couche L (fig. 266).

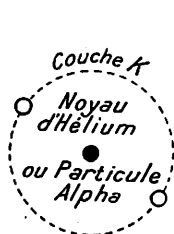


Fig. 265.

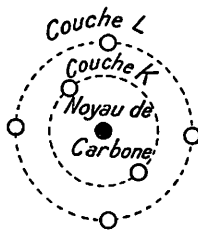


Fig. 266.

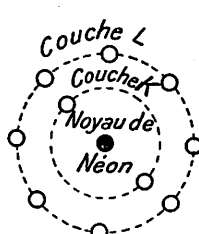


Fig. 267.

3°) **Néon** ($N : 10 ; M : 20$). Noyau ; 10 électrons planétaires saturant les couches K et L (fig. 267).

4°) **Sodium** ($N : 11 ; M : 23$). Noyau ; 11 électrons planétaires : couches K et L complètes ; couche M comportant 1 électron (fig. 268).

Remarques. — a) Suivant cette conception, toutes les masses atomiques doivent être des nombres entiers si on attribue le nombre 1 à la masse de l'atome d'hydrogène. Effectivement les recherches d'Aston ont montré que les éléments à masse atomique fractionnaire sont constitués de mélanges d'atomes de masse atomique entière. Le chlore, par exemple, dont la masse atomique est 35,5 est formé d'un mélange d'atomes de masses 35, 37 et 39 mais de même nombre atomique 17. Tous les chlores, quelle qu'en soit la masse atomique, comportent un noyau ainsi que 17 électrons planétaires disposés comme suit : 2 sur la

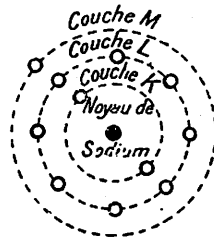


Fig. 268.

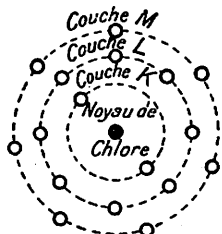


Fig. 269.

couche K , 8 sur la couche L , 7 sur la couche M (fig. 269). Ces divers atomes de l'élément chlore ont les mêmes propriétés chimiques et sont inséparables par les méthodes ordinaires. Ils occupent donc la même place dans le tableau périodique de Mendelejeff ; ils ont été appelés pour ce motif **isotopes**.

b) La couche électronique K est complète avec 2 électrons, la couche L est complète avec 8 électrons, la couche M est complète avec 18 électrons, la couche N est complète avec 32 électrons, la couche O est complète avec 18 électrons.

211. STRUCTURE DU NOYAU. — Soumis à l'action d'un bombardement corpusculaire puissant (rayons α , électrons accélérés, rayons cosmiques) le noyau libère deux espèces de particules : le proton qui possède une charge + 1 et une masse 1 ainsi que le neutron qui, électriquement neutre, possède une masse 1. Le neutron serait formé par la réunion d'un proton et d'un électron. Les protons et les neutrons sont donc les constituants profonds de tout noyau atomique.

Voici quelques exemples de structure nucléaire :

Noyau du carbone (N : 6, M : 12)	6 protons, 6 neutrons
Noyau de l'azote (N : 7, M : 14)	7 protons, 7 neutrons
Noyau de l'aluminium (N : 13, M : 27)	13 protons, 14 neutrons
Noyau du chlore (N : 17, M : 35)	17 protons, 18 neutrons

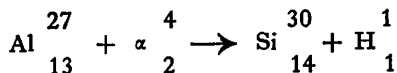
D'une façon générale, le noyau d'un atome X de nombre atomique N et de masse atomique M est constitué de N protons (charge 1 et masse 1) puisque la charge est N et de (M - N) neutrons (charge 0 et masse 1) puisque la masse est N + M - N ou M.

212. TRANSMUTATION SPONTANÉE DES ATOMES. — La transmutation de la matière consiste en la transformation d'un élément en un autre. Rêvée des alchimistes du Moyen Age, considérée comme impossible au siècle dernier à la suite des travaux du célèbre chimiste Lavoisier, la transmutation est actuellement réalisée pour de nombreux éléments.

Dans les phénomènes radioactifs, nous assistons à une dislocation spontanée des noyaux atomiques. Le noyau de l'atome radioactif explose en émettant soit une particule α , soit une particule β (qui proviendrait de la transformation d'un neutron en proton); il en résulte dans le premier cas une perte de masse (4) et de charge (2) du noyau, dans le second cas un gain de charge (1) du noyau. Par l'explosion, l'atome d'un élément se transforme en un atome d'un autre élément plus simple. La période radioactive, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que la moitié des atomes de la substance radioactive soient désintégrés, varie énormément avec la nature de l'élément mais est absolument indépendante des facteurs physiques : température, pression, potentiel électrique... La figure 270 donne une des transformations radioactives dans la série de l'uranium. Les nombres qui accompagnent l'élément indiquent la masse atomique, le nombre atomique (par conséquent, la charge positive du noyau) et la période radioactive de l'élément radioactif.

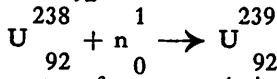
On remarquera que les éléments radioactifs ont une masse atomique élevée.

213. TRANSMUTATION PROVOQUÉE DES ATOMES. — En 1919, Rutherford (physicien anglais : 1871) réussit la première transmutation provoquée. Sous l'influence du bombardement par les particules α , particules de grande énergie, les noyaux d'éléments légers (azote, bore, aluminium,...) émettent des protons. L'examen approfondi des expériences fait admettre que la particule α s'agglutine d'abord au noyau pour former un noyau plus complexe qui explose ensuite en expulsant un proton. La masse du noyau atomique résiduel s'est accrue de 3, sa charge de 1. Si nous convenons de représenter le noyau de l'atome par le symbole chimique affecté de deux indices qui indiquent la masse atomique et le nombre atomique, l'équation de la transmutation de l'aluminium s'écrit :

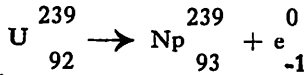


Depuis les expériences de Rutherford, d'autres projectiles (protons, neutrons, rayons cosmiques) se sont montrés capables de provoquer ces transmutations. Dans la « pile atomique » imaginée en 1942 par Fermi au cours des recherches sur la bombe atomique, il se forme des éléments (neptunium et plutonium) plus lourds que l'uranium, éléments que l'on qualifie de transuraniens.

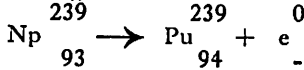
L'uranium U^{238}_{92} irradié par des neutrons n^1_0 se transforme en uranium U^{239}_{92} .



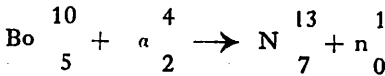
qui se transforme, par émission d'un électron négatif, en neptunium Np^{239}_{93}



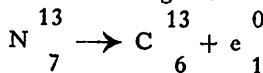
qui se transforme à son tour en plutonium Pu^{239}_{94} par émission d'un électron négatif.



214. RADIOACTIVITÉ ARTIFICIELLE. — Par des opérations identiques à celles que nous venons de décrire, Joliot et Joliot-Curie ont pu créer, en 1931-32, des éléments radioactifs de faible masse atomique et de période radioactive de l'ordre de quelques minutes. Par exemple, le bore irradié par les rayons α se transforme en radioazote en expulsant un neutron.



Ce radioazote se transforme en carbone en émettant un électron positif (positron) qui a même charge et même masse que l'électron négatif.



215. FISSION ET FUSION. — a) **Fission des atomes.** — En 1938, Hahn et Strassmann soumirent l'uranium à un bombardement par des neutrons. Les neutrons ont, sur les électrons et les particules α , l'avantage de ne pas subir d'actions électriques de la part des éléments constitutifs

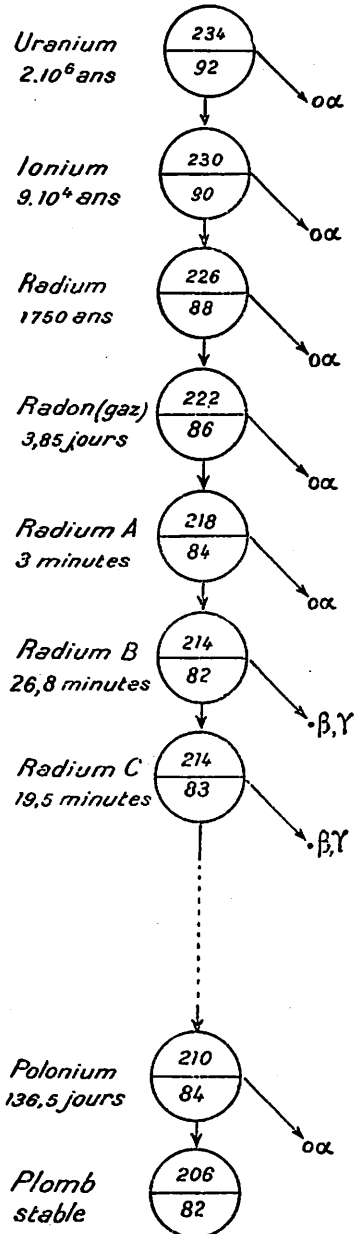
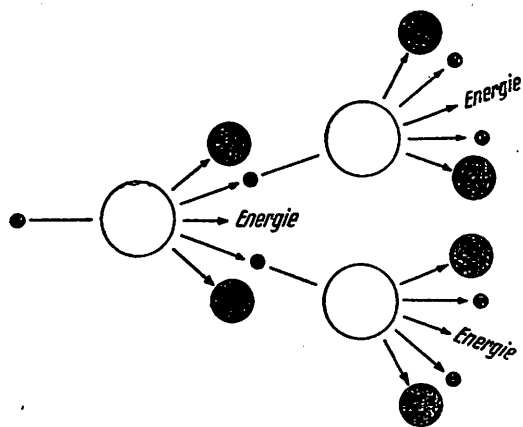


Fig. 270.

des atomes. Les résultats de l'expérience de [Hahn et Strassmann furent surprenants : sous l'action des neutrons, les noyaux d'uranium 235 se brisent en morceaux. Dans les transformations obtenues par le bombardement d'un élément à l'aide d'électrons ou de particules α , les atomes qui prennent naissance sont toujours de masse atomique et de nombre atomique voisins de ceux de l'élément qui se désintègre. Dans les transformations obtenues par le bombardement de l'uranium 235 à l'aide de neutrons, les atomes qui prennent naissance sous le choc sont à peu près identiques : l'uranium 235 frappé par le neutron se brise, en expulsant des neutrons, en deux gros fragments dont l'un a une masse atomique comprise entre 83 et 115 et dont l'autre a une masse atomique comprise entre 127 et 154 (fig. 271).



LÉGENDE



Fig. 271.

Cette rupture en gros fragments qui est accompagnée d'une libération énorme d'énergie (la fission d'un atome d'uranium dégage 50 millions de fois

l'énergie dégagée par la combustion d'un atome de carbone : la fission de 1 g d'uranium 235 dégage donc autant d'énergie que la combustion de 2500 kg de charbon) s'appelle **fission** ou **bipartition**. Les neutrons libérés au cours de la fission de l'atome d'uranium 235 sont capables de provoquer l'explosion d'atomes d'uranium 235 voisins de sorte que, une fois amorcée, la réaction se propage d'elle-même à toute la masse traitée (réaction en chaîne). Réaction en chaîne produisant une libération d'une énorme quantité d'énergie atomique, tel est le principe essentiel de la bombe atomique et de la pile atomique (2).

Les rayons cosmiques exerceraient des effets nucléaires mille fois plus violents encore que les effets nucléaires produits par les neutrons : ils provoqueraient la désintégration totale du noyau en ses particules élémentaires.

b) Fusion des atomes. — La physique théorique montre que la synthèse des éléments au départ des éléments très légers (H, He, Li...) fournirait plus d'énergie encore, par unité de masse, que la fission. L'opération qui consiste à réunir plusieurs noyaux légers en un seul noyau est la **fusion**.

(1) Il apparaît, d'après les derniers renseignements, que la bombe atomique est constituée en principe de deux demi-sphères d'uranium 235 ou de plutonium disposées aux extrémités d'un tube cylindrique. Pour provoquer l'explosion, la demi-sphère mobile est brutalement mise au contact de la demi-sphère fixe. Dans ces conditions, le diamètre de la sphère d'uranium ou de plutonium est supérieure à la dimension critique c'est-à-dire à la dimension nécessaire à amplifier la réaction en chaîne. La réaction en chaîne se propageant de proche en proche, l'explosion de la bombe se produit.

La masse d'uranium 235 d'une bombe atomique à uranium serait de quelque 68 kg. La libération d'énergie produite par une bombe atomique à uranium 235 correspondrait à 70 000 000 000 kcal équivalent à la combustion presque instantanée de 8 800 t de charbon.

C'est à la fusion, sous l'action de très hautes températures, que le Soleil et les étoiles rayonnent de l'énergie depuis des millions d'années sans rien perdre de leur activité.

On connaît deux isotopes de l'hydrogène H_1^1 : le deutérium D_1^2 et le tritium T_1^3 . Le deutérium existe en proportion infime (0,003 %) dans l'hydrogène naturel et en combinaison avec l'oxygène dans l'eau; il est extrait de l'eau lourde que fournissent les résidus d'électrolyse de l'eau acidulée.

Parmi les réactions de fusion, les moins difficiles seraient (fig. 272)

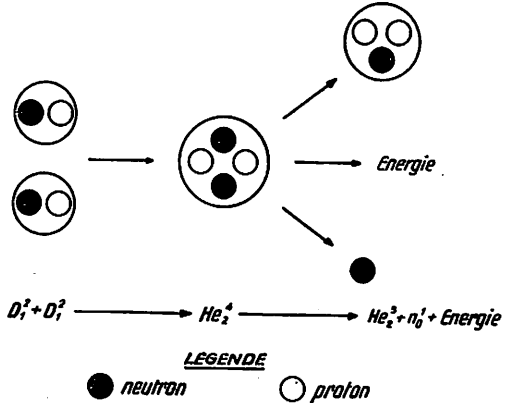
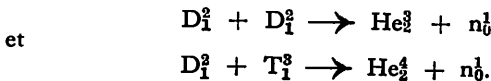


Fig. 272.



Ces réactions de fusion sont réalisées dans la bombe H où elles sont amorcées par une bombe à fission qui porte des points de la masse à la température de plusieurs millions de degrés. Pour domestiquer l'énergie de fusion, on tente de réaliser en laboratoire pendant une fraction de seconde la température requise : dans l'appareil Zeta, le deutérium emmagasiné dans un anneau en verre est soumis pendant 2 à 3 millièmes de seconde à une température de l'ordre de 5 000 000 de degrés.

216. RÉGIONS DE L'ATOME. — On est parvenu à localiser l'origine des divers phénomènes dont l'atome est le siège (fig. 273) :

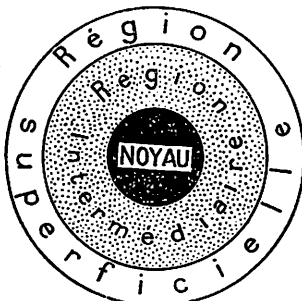


Fig. 273.

1°) La **région centrale** (noyau) est particulièrement stable, convenablement protégée de toute influence extérieure par la masse des électrons planétaires. Dans les circonstances ordinaires le noyau, donc l'élément, est inaltérable.

2°) La **région superficielle**, comportant la dernière couche électronique de l'atome, commande la plupart des propriétés physiques ou chimiques de l'élément : valence, affinité, conductibilité électrique, conductibilité calorifique, émission de lumière, ionisation, etc... C'est cette couche que peuvent facilement modifier les divers facteurs physiques et chimiques : température, lumière, réaction chimique, etc... La variation périodique du nombre des électrons de cette couche explique la périodicité des propriétés des éléments.

3°) La **région intermédiaire** comprend les couches électroniques internes que peuvent atteindre les rayons X, les rayons cathodiques, les rayons α . C'est dans cette région que prennent naissance les rayons X.

Complément au Tome II du COURS DE PHYSIQUE

par A. DESSART et J. JODOGNE

Maison d'Édition A. DE BOECK, 265, rue Royale, BRUXELLES

§ 1. COURANT ÉLECTRIQUE

1. GÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES. — Les générateurs électriques (sources d'énergie électrique) les plus employés sont :

les **piles** et les **accumulateurs** qui utilisent l'énergie des réactions chimiques;

les **dynamos** et les **alternateurs** qui transforment en énergie électrique l'énergie mécanique nécessaire à leur rotation.

Les générateurs électriques comportent deux bornes, les **pôles**. En reliant les pôles du générateur par des fils métalliques à un récepteur électrique, on obtient un **circuit électrique**. Ce circuit est le siège de phénomènes que nous allons étudier.

2. EFFETS DU COURANT ÉLECTRIQUE. — Expérience. — Réali-

sons le circuit représenté par la figure 1. Il comprend un interrupteur K, un fil métallique mince R recouvert de paraffine et un voltamètre. Le voltamètre est constitué d'un long tube en U dont chaque branche est terminée par un robinet. Deux fils de platine, aboutissant à la partie inférieure de chacune de ces branches, constituent les bornes ou **électrodes** du voltamètre. L'appareil est rempli d'une solution aqueuse d'acide sulfurique. Une **aiguille aimantée NS**, mobile sur un pivot vertical, est disposée sous le fil métallique R qui est orienté dans la direction Nord-Sud : fil et aiguille aimantée sont parallèles entre eux.

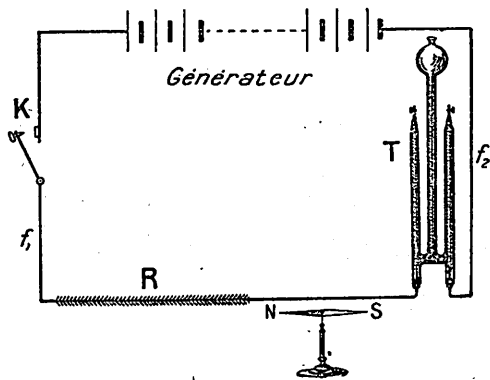


Fig. 1.

Tant que l'interrupteur K est ouvert, nous n'observons aucun changement dans le circuit : le circuit est dit **ouvert**.

Fermons l'interrupteur K. Observons (fig. 2) :

1°) la fusion de la paraffine due à l'échauffement du fil métallique R;

2°) la déviation de l'aiguille aimantée NS qui tend à se mettre en croix avec le fil R;

3°) les dégagements gazeux aux électrodes en platine du voltamètre.

Caractérisons les gaz accumulés dans les branches du tube en U du voltamètre : l'un est l'hydrogène, l'autre l'oxygène.

Nous disons que le circuit fermé par l'interrupteur K est devenu le siège d'un **courant électrique**, fourni par le générateur. Ce courant passe

d'un pôle du générateur à l'autre par l'intermédiaire des fils métalliques et de l'eau acidulée.

Ouvrons l'interrupteur K. Observons que l'échauffement du fil métallique R, la déviation de l'aiguille aimantée NS, les dégagements gazeux dans le voltamètre T cessent immédiatement : le courant électrique est interrompu.

Tous ces phénomènes reprennent dès qu'on ferme de nouveau l'interrupteur.

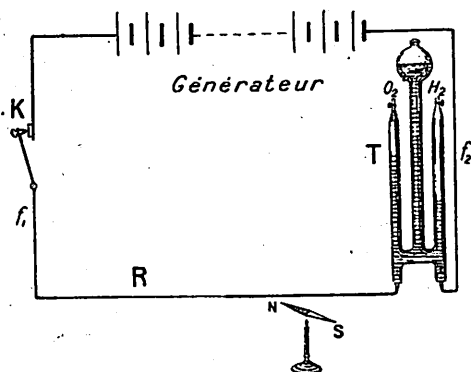


Fig. 2.

Conclusion. — Si nous constatons dans un circuit électrique des effets calorifiques, chimiques et magnétiques, ou l'un d'eux seulement, nous disons que le circuit est parcouru par un courant électrique.

Réciproquement le courant qui traverse un circuit y produit des effets calorifiques, magnétiques et chimiques.

3. CONDUCTEURS ET ISOLANTS. — **Expériences.** — a) Remplaçons le fil de cuivre f_1 du dispositif employé dans l'expérience précédente par un fil de fer, un fil d'argent..., le courant passe dans le circuit lorsque nous abaissons l'interrupteur K.

b) Remplaçons le fil de cuivre f_2 du dispositif employé dans l'expérience précédente par un fil de soie ou de laine, une lanière de caoutchouc, une tige de verre ou de bois (sec), le courant ne passe pas dans le circuit lorsque nous abaissons l'interrupteur K.

Conclusion. — Nous expliquons la différence de comportement entre le cuivre, le fer... d'une part et la soie, le caoutchouc... d'autre part en disant que les premiers sont bons **conducteurs** de l'électricité et que les seconds sont mauvais conducteurs de l'électricité ou **isolants**. Parmi les conducteurs, citons les métaux, les solutions aqueuses d'acides, de bases et de sels... Parmi les isolants, citons le verre, la porcelaine, le caoutchouc, la paraffine, le mica, l'eau distillée, le pétrole, l'huile, les gaz.

Il résulte de ce qui précède qu'il suffit d'intercaler un isolant (air, verre, caoutchouc...) dans un circuit électrique fermé pour interrompre le courant.

4. SENS CONVENTIONNEL DU COURANT. — **Expérience.** —

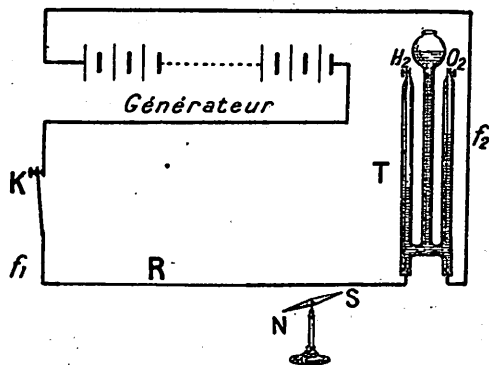


Fig. 3.

Sans rien changer au circuit du n° 2, permutons les connexions avec les pôles du générateur (fig. 3). L'échauffement du fil R se produit à nouveau, l'aiguille aimantée NS dévie en sens inverse du sens de la déviation de l'expérience précédente, les dégagements d'hydrogène et d'oxygène sont également inversés.

Conclusion. — L'inversion qui se produit dans les phénomènes magnétiques et chimiques montre que nous devons, pour en décrire exactement les effets, attribuer un sens au courant électrique.

Les pôles d'un générateur ont donc des propriétés différentes. Le pôle du générateur relié à l'électrode sur laquelle se dégage l'oxygène est appelé **pôle positif**; le pôle du générateur relié à l'électrode sur laquelle se dégage l'hydrogène est appelé **pôle négatif**. Nous représentons un générateur par deux traits : le pôle positif est figuré par un trait long et mince; le pôle négatif est figuré par un trait court et gros (fig. 1).

Conventionnellement, comme l'a fait Ampère (physicien français : 1775-1836), on admet que le courant électrique chemine le long du circuit extérieur au générateur du pôle positif au pôle négatif, à l'intérieur du générateur du pôle négatif au pôle positif.

5. INTENSITÉ DU COURANT. — **Expériences.** — a) Répétons l'expérience n° 2 en prenant successivement pour générateur un nombre plus grand d'accumulateurs ou une dynamo. Nous observons que les trois effets du courant augmentent : chaleur dégagée par le fil, déviation de l'aiguille aimantée, dégagement

Le courant alternatif = ... qui a toujours le même sens qui change périodiquement

gazeux. On dit que le courant électrique est devenu plus intense. L'un quelconque de ces effets peut servir à la définition de l'intensité. Choisissons l'effet chimique.

b) Faisons passer le courant électrique fourni par une batterie d'accumulateurs dans un voltamètre à eau acidulée. Chronométrons plusieurs fois le temps nécessaire au dégagement de 10 cm³ d'hydrogène. Nous observons que ces temps sont toujours les mêmes.

Conclusion. — Comme nous pouvons mesurer l'intensité d'une force par les déformations qu'elle produit, nous pouvons mesurer l'intensité d'un courant électrique par le volume d'hydrogène dégagé pendant un certain temps.

Nous convenons de dire :

1°) que deux courants électriques ont même intensité lorsqu'ils dégagent pendant le même temps, dans un même voltamètre, le même volume d'hydrogène;

2°) que l'intensité d'un courant électrique vaut 2, 3, 4... fois celle d'un autre, lorsque le volume d'hydrogène dégagé par le premier vaut 2, 3, 4... fois le volume d'hydrogène dégagé par le deuxième pendant le même temps dans le même voltamètre.

On pourrait prendre n'importe quel autre électrolyte pour définir l'intensité. Il est préférable, pour des raisons pratiques, de remplacer le voltamètre à eau acidulée par le voltamètre à nitrate d'argent et à électrodes en argent. Le courant dépose de l'argent sur l'électrode négative.

L'intensité d'un courant est proportionnelle à la masse d'argent déposée par seconde dans un voltamètre à nitrate d'argent.

6. UNITÉ D'INTENSITÉ. — Pour définir l'unité d'intensité il faut fixer arbitrairement la masse d'argent déposée par le courant en une seconde. Pour des raisons historiques, on a choisi comme **unité d'intensité l'intensité du courant qui dépose par seconde 1,118 mg d'argent dans un voltamètre à nitrate d'argent.** Cette intensité est appelée ampère international ou simplement **ampère (A).**

Pour fixer les idées disons que l'intensité du courant qui parcourt les fils télégraphiques est de l'ordre du millième d'ampère, que l'intensité du courant qui traverse une lampe ordinaire est de quelques dixièmes d'ampère, que l'intensité du courant qui alimente les moteurs peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères.

Le corps humain peut supporter sans danger des courants ne dépassant pas 20 mA.

7. MESURE DE L'INTENSITÉ. — Ampèremètres. — L'intensité d'un courant électrique se mesure à l'aide d'ampèremètres. Le voltamètre à eau acidulée ou le voltamètre à nitrate d'argent peut servir à déterminer l'intensité d'un courant : il est toutefois d'un maniement difficile et délicat. La déviation d'une aiguille aimantée sous l'action d'un courant électrique est, par contre, d'une lecture directe et aisée.

Les ampèremètres ordinaires sont basés sur l'effet magnétique des courants : ils comportent une aiguille qui se déplace sous l'action du courant devant un cadran gradué qui donne par lecture directe l'intensité du courant (fig. 4). Nous étudierons ultérieurement la constitution de ces appareils. Les ampèremètres sont de sensibilités diverses : le **galvanomètre** est un ampèremètre permettant de déceler le millionième, voire le milliardième d'ampère.

En principe, les ampèremètres sont gradués par des mesures faites au voltamètre à nitrate d'argent : on intercale dans un circuit l'ampère-

mètre à graduer et le voltamètre à nitrate d'argent, on laisse passer le courant pendant un temps déterminé, on déduit l'intensité du courant de l'augmentation de masse de l'électrode négative du voltamètre et on inscrit en ampères sur le cadran de l'ampèremètre l'intensité du courant.

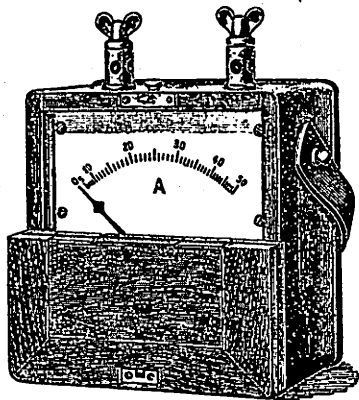


Fig. 4.

Remarque : L'ampèremètre doit toujours être traversé par le cou-

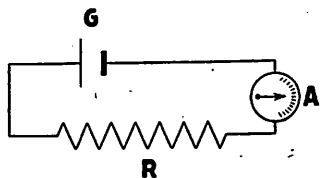


Fig. 5.

rant : il doit donc être placé dans le circuit. La figure 5 schématise un circuit renfermant une source électrique, un récepteur R et un ampèremètre A.

8. QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ. — Quand un courant d'eau passe par une canalisation, le volume d'eau (la quantité d'eau) qui traverse la canalisation est proportionnel au temps et au débit. De même lorsqu'un courant électrique passe dans un circuit, nous disons que la **quantité d'électricité** ou **charge électrique** qui a traversé une section du circuit est proportionnelle au temps de passage du courant et à l'intensité du courant.

Si Q désigne la quantité d'électricité, I l'intensité du courant et t le temps de passage du courant, on a la relation :

$$Q = kIt$$

9. UNITÉ DE QUANTITÉ DE L'ÉLECTRICITÉ. — On choisit l'unité de quantité d'électricité telle que k devienne égal à 1. Dans la formule $Q = It$, faisons $I = 1 \text{ A}$ et $t = 1 \text{ s}$: nous définissons l'unité de quantité d'électricité ou le **coulomb** (Coulomb, physicien français : 1736-1806) par

$$1 \text{ coulomb} = 1 \text{ ampère} \cdot 1 \text{ seconde}$$

Le coulomb (C) ou ampère-seconde (As) est la quantité d'électricité transportée par un courant de 1 ampère en 1 seconde.

Le coulomb est donc la quantité d'électricité qui dépose 1,118 mg d'argent dans un voltamètre à nitrate d'argent.

Remarque : Si le temps de passage d'un courant de 1 A est de 1 s, la quantité d'électricité transportée est de 1 As ou 1 C.

Si le temps de passage de ce même courant est de 1 h c'est-à-dire de 3600 s, la quantité d'électricité transportée est de 3600 As ou 3600 C.

Cette quantité d'électricité est appelée 1 **ampère-heure** (1 Ah).

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C} \text{ ou } 1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As.}$$

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — On fait passer un courant électrique dans un voltamètre à nitrate d'argent pendant 10 minutes. L'électrode négative d'argent accuse une augmentation de masse de 1,770 g. Déterminer : a) la charge électrique qui a traversé le voltamètre ; b) l'intensité du courant supposé constant.

SOLUTION. — a) Charge électrique : $Q = 1,770/0,00118 = 1500 \text{ C.}$

b) Intensité du courant : $I = Q/t; I = 1500/60.10 = 2,5 \text{ A.}$

§ 2. TENSION ÉLECTRIQUE

10. TENSION ÉLECTRIQUE. — 1. Analogie. — a) Considérons deux vases V et V' reliés par la canalisation LL' dans laquelle nous introduisons une membrane élastique M. Parce que le niveau du liquide dans le vase V est supérieur à celui du vase V', la membrane s'incurve et indique par là une différence de pression hydrostatique existant entre les deux niveaux (fig. 6).

b) Si nous enlevons la membrane, cette différence de pression produit un courant liquide de L vers L' (fig. 6). Ce courant dure tant que la pompe P

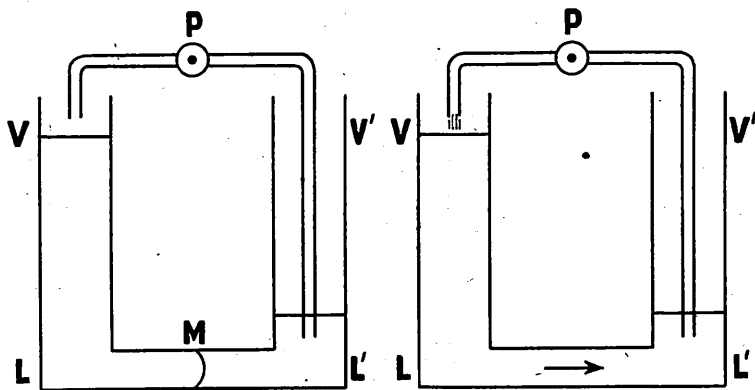


Fig. 6.

maintient la différence de niveau entre les surfaces libres du liquide dans les deux vases.

2. Expériences. — a) Relions les plateaux métalliques P et P' aux pôles d'un générateur électrique puissant (fig. 7). Le plateau P' suspendu à un dynamomètre sensible est attiré par le plateau fixe P. La force d'attraction indique qu'il existe une différence de l'état électrique entre les deux plateaux.

Entre deux conducteurs reliés aux pôles d'une source électrique il s'exerce une force d'attraction. Entre les deux conducteurs il existe donc une différence de l'état électrique que nous appelons **différence de potentiel** ou **tension électrique**.

b) Si nous relions les bornes du générateur par un fil métallique, un courant s'établit dans ce circuit fermé. La cause de ce courant est la différence de l'état électrique des deux bornes du générateur, différence que nous venons de désigner par différence de potentiel ou tension.

Dans le circuit électrique le rôle du générateur est analogue à celui de la pompe : il maintient constante la différence de potentiel (la tension) entre ses bornes.

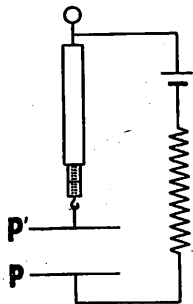


Fig. 7.

Constituons le circuit de la figure 8, qui est traversé par un courant constant. Relions deux points A et B de ce circuit par un conducteur C (petite lampe et fils de connexion).

Nous constatons qu'un courant électrique passe dans le conducteur C. Nous en concluons que le point A ne se trouve pas dans le même état électrique que le point B.

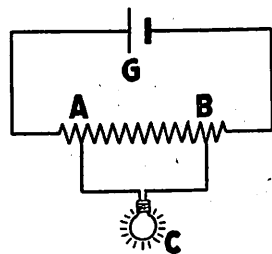


Fig. 8.

Si nous rapprochons le point B de A, nous observons que le conducteur C est traversé par un courant plus faible; si nous éloignons B de A, nous observons que le conducteur C est traversé par un courant plus intense.

Entre deux points A et B d'un conducteur il existe une **différence de potentiel** ou **tension électrique** si le conducteur est traversé par un courant.

En résumé on peut dire qu'une tension électrique entre deux conducteurs se manifeste par l'un des effets suivants :

- 1^o) force d'attraction entre ces conducteurs;
- 2^o) courant électrique dans le circuit reliant ces deux conducteurs.

11. MESURE DE LA TENSION. — Les deux effets de la tension peuvent être utilisés pour sa mesure.

L'**électromètre statique** ou **voltmètre électrostatique** est basé sur la force d'attraction entre deux conducteurs auxquels est appliquée une tension.

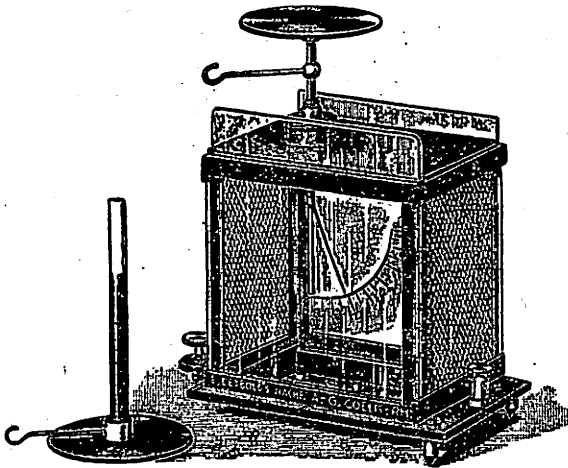


Fig. 9.

L'électromètre statique (fig. 9) est constitué d'une tige isolée qui porte à sa partie inférieure une ou deux feuilles d'aluminium ou d'or très minces. Cette tige est renfermée dans une cage métallique fermée à l'avant et à l'arrière par des plaques de verre. On relie la tige à l'un des pôles de la source et la cage métallique à l'autre. Entre la cage et la feuille mince s'exerce une force d'attraction qui fait

prendre à la feuille une nouvelle position d'équilibre.

On convient de dire que deux tensions électriques sont égales si elles produisent les mêmes forces d'attraction et que l'une est 2, 3, 4... fois plus grande que l'autre, si la force qu'elle produit est 2, 3, 4... fois plus grande que celle produite par la deuxième.

Nous verrons plus tard qu'on utilise le deuxième effet de la tension électrique dans un appareil appelé **voltmètre**.

12. UNITÉ DE TENSION ÉLECTRIQUE. — Mesurons à l'aide d'un électromètre statique la tension d'une source appropriée (batterie de piles ou dynamo) plusieurs fois de suite. Nous observons que l'indication de l'électromètre est toujours la même. Nous en concluons que la tension électrique entre les deux pôles de la source utilisée est constante.

Une source électrique maintient donc entre ses pôles une tension électrique constante.

Pour définir l'**unité de tension**, on peut prendre celle qui existe entre les pôles d'une pile quelconque. On a choisi arbitrairement une pile appelée **pile étalon**. (fig. 10). Entre les pôles de cette pile étalon, il existe une tension électrique constante dont la valeur a été fixée, pour des raisons historiques, à 1,10183 Volt (V) à la température de 20° C.

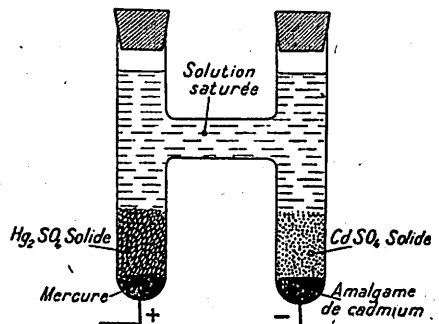


Fig. 10.

L'unité de tension électrique est le volt. (Volta, physicien italien, 1745-1827.)

Le Volt est donc $1/1,0183$ de la tension aux bornes de la pile étalon à 20° C.

Pour fixer les idées, disons que la tension d'une cellule d'un accumulateur au plomb est de 2 V; celle d'une pile sèche de 1,5 V; celle aux bornes d'un circuit d'éclairage est de 110 V ou 220 V; celle existant entre les câbles des lignes de transmission aériennes de l'énergie électrique est de quelques centaines de milliers de volts.

13. SOMME DE TENSIONS. — Nous disposons de 2 batteries de piles dont nous mesurons les tensions U et U' avec l'électromètre. Groupons ces deux batteries en reliant le pôle négatif de l'une au pôle positif de l'autre : on dit que les sources sont placées **en série**.

Nous observons que l'électromètre nous donne une tension qui est égale à la somme des tensions U et U'.

Lorsqu'on branche des sources en série, leurs tensions s'ajoutent. Chaque accumulateur au plomb a une tension de 2 V; une batterie de 2 accumulateurs au plomb a une tension de 4 V; une batterie de 3 accumulateurs au plomb a une tension de 6 V. Pour avoir 12 V il faut mettre en série 6 accumulateurs au plomb.

§ 3. THÉORIE ÉLECTRONIQUE

14. ÉLECTRONS. — Des faits expérimentaux que nous étudierons plus tard montrent que les charges électriques sont des multiples entiers d'une charge électrique élémentaire ou quantum d'électricité. Comme la matière, l'électricité a une structure discontinue.

Le granule d'électricité négative ou **électron** joue un rôle particulièrement important. Il a pu être isolé c'est-à-dire être obtenu sans support matériel (Tome II, n° 198). Il a une charge de $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, une masse de $9 \cdot 10^{-28}$ gramme (la masse de l'électron est 1835 fois plus petite que la masse de l'atome d'hydrogène) et un rayon de $2,8 \cdot 10^{-13}$ cm.

15. ATOMES. — L'atome n'est pas, comme on l'avait admis au début de la théorie atomique, insécable. D'après Rutherford (physicien anglais : 1871-1937) et Bohr (physicien danois né en 1885), l'atome est constitué d'un **noyau** central, très petit, très lourd, chargé d'électricité positive. Le noyau, qui condense pratiquement toute la masse de l'atome, est entouré d'un essaim d'électrons planétaires comme le Soleil est entouré de planètes. La charge négative totale des électrons neutralise la charge positive du noyau de sorte que l'atome est, par compensation, **électriquement neutre**.

16. IONS. — Tout atome qui perd un ou plusieurs électrons se transforme en **ion positif**. Tout atome qui capte un ou plusieurs électrons se transforme en **ion négatif**. L'ion positif redevient un atome en captant les électrons qui lui font défaut; l'ion négatif redevient un atome en perdant les électrons qu'il a en excès.

L'électricité positive est liée à un support matériel tandis que l'électricité négative se présente sous deux formes : les ions négatifs liés à un support matériel et les électrons libres sans support matériel.

17. CONDUCTEURS ET ISOLANTS. — Dans un **conducteur**, il y a des électrons qui ne sont pas rigidement liés à des atomes déterminés : ces électrons qui se déplacent aisément dans les espaces libres existant entre les atomes sont animés de mouvements désordonnés comme le sont les molécules des gaz. La théorie cinétique des gaz (Tome I, n° 338) peut être appliquée

aux électrons libres. Un apport d'électrons à un conducteur ne reste donc pas localisé à l'endroit où il se produit : les électrons amenés en un point du conducteur se répartissent sur toute la surface du conducteur à cause de leur répulsion mutuelle.

Dans un **isolant**, les électrons sont liés rigidement à des atomes déterminés par des forces considérables : les électrons ne sont pas libres de passer d'un atome à l'autre. Les sauts d'électrons d'un atome à l'autre ne se produisent que très difficilement. Un apport d'électrons à un isolant reste localisé à l'endroit où il se produit.

Substitution au courant électrique du conducteur.

18. COURANT ÉLECTRIQUE. — Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée aux extrémités d'un conducteur métallique, ce conducteur est le siège d'un champ électrique. Sous l'action de ce champ, les électrons libres, très mobiles et pratiquement impondérables, prennent un mouvement d'ensemble dans la masse du conducteur et se dirigent vers la borne positive. Les ions positifs ne se déplacent pas car le passage du courant dans un conducteur métallique ne s'accompagne d'aucune migration de matière.

Le courant électrique dans un conducteur métallique est donc constitué d'un flux d'électrons qui se dirigent vers la borne positive. Le sens du courant est donc, en réalité, inverse du sens conventionnel. Dans le cas d'un circuit fermé, le générateur ramène continuellement les mêmes électrons à circuler dans le conducteur.

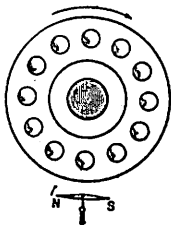


Fig. 11.

L'expérience de Rowland prouve qu'une charge électrique en mouvement produit le même effet magnétique qu'un courant. Un disque isolant porte plusieurs petites sphères métalliques (fig. 11). Quand les sphères ne sont pas électrisées, la rotation du disque n'exerce aucune action sur l'aiguille aimantée.

Fourn Puisque le courant est constitué d'un flux d'électrons, son débit c'est-à-dire son intensité est le produit de la charge électrique e d'un électron par le nombre n d'électrons écoulés par seconde à travers la section du conducteur.

$$I = n \cdot e$$

X **EXEMPLE NUMÉRIQUE.** — Combien doit-il passer d'électrons par seconde par une section du conducteur pour que le courant ait une intensité de 1 A ?

Solution. — Chaque électron transporte une charge $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Si le courant a une intensité de 1 A, la charge électrique traversant le conducteur en 1 s est 1 C.

Donc

$$n = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,3 \cdot 10^{18} \text{ électrons.}$$

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Une bobine, formée de fil de cuivre ($\rho = 2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) de 0,1 mm de diamètre est branchée sur une source de courant dont la tension aux bornes est 110 V. L'intensité du courant dans la bobine est 0,25 A. On demande : a) la longueur du fil constituant la bobine; b) la chaleur dégagée en une heure par le courant dans la bobine; c) la dépense horaire sachant que le kWh se paie 2,80 f; d) la résistance à intercaler en série dans le circuit pour amener l'intensité à 0,1 A. R : a) 172,7 m; b) 23 760 cal; c) 0,077 f; d) 660 Ω .

2. Une lampe à filament de tungstène de 60 décalumens consomme 1 watt par décalumen sous une tension de 130 volts. On demande : 1°) l'intensité du courant; 2°) la résistance de la lampe à chaud; 3°) la chaleur dégagée dans la lampe en une heure sachant que 95 % de l'énergie électrique sont transformés en chaleur. R : 1°) 0,461 A; 2°) 282 Ω ; 3°) 49 2+8 cal.

3. La lampe de l'exercice précédent laisse passer, sous une tension de 1,2 V, un courant de 40 mA à la température de 40° C. Calculer la température approximative à laquelle est porté le filament de la lampe en fonctionnant sous la tension de 130 V sachant que le coefficient de température du tungstène est 0,0045. R : 2 240° C.

4. Montrer mathématiquement que la longueur d'un fusible en plomb de section uniforme n'a aucune influence sur l'intensité limite.

5. La résistance d'un ampèremètre indiquant de 0 à 1 A est de 0,02 Ω . On veut le shunter pour qu'il indique 10 A. Quelle doit être la longueur du fil de cuivre ($\rho = 2 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) de 1 mm² de section qui sert de shunt? R : 11,11 cm.

6. En combien de temps un courant de 5 A décompose-t-il a) 4,5 g d'eau; b) 11,7 g de sel marin fondu? (Poids atomiques : H = 1, O = 16, Na = 23, Cl = 35,5; Valences : H, Na et Cl = 1, O = 2). R : a) 2 h 40 min 30 s; b) 1 h 4 min 20 s.

7. On cuivre en 2 heures un objet de 30 cm² de surface au moyen d'un courant de 3 A. Quelle est l'épaisseur moyenne du cuivre déposé sur l'objet? (Cuivre : poids atomique = 63,5; valence : 2; densité : 8,5). R : 0,277 mm.

8. On réunit les pôles d'une pile par un fil de maillechort de 5 m de longueur et de 1 mm² de section; le courant dans le circuit est dans ces conditions de 1,06 A. On substitue au fil de maillechort un fil de fer de même longueur et de même section: le courant dans le circuit est dans ces conditions de 1,9 A. Calculer : a) la force électromotrice de la pile; b) la résistance de la pile. (maillechort: $\rho = 30 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$; fer: $\rho = 15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$). R : a) 1,8 V; b) 0,2 Ω .

9. Une pile de force électromotrice 1,8 V et de résistance interne 3 Ω débite dans un circuit extérieur constitué de trois résistances mises en dérivation et respectivement égales à 10, 20 et 60 Ω . Déterminer : a) l'intensité du courant dans chacune des dérivations; b) la tension aux bornes des dérivations. R : a) 0,12 A, 0,06 A, 0,02 A; b) 1,2 V.

10. Un circuit électrique comprend, disposés en série, quatre accumulateurs ($E = 2 \text{ V}$; $r_i = 0,05 \Omega$), une résistance de 20 Ω et une cuve à électrolyse. L'intensité du courant dans le circuit est 0,25 A. On demande : a) la tension aux bornes du générateur; b) la résistance apparente de la cuve à électrolyse; c) le temps nécessaire pour dégager 5 l de gaz tonnant. R : a) 7,95 V; b) 11,8 Ω ; c) 115 000 s.

11. On réunit les deux pôles d'une pile par un fil de maillechort ($\rho = 30 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) de 50 m de longueur et de 0,75 mm² de section. Le fil est parcouru par un courant de 0,075 A. Pour doubler l'intensité du courant dans le fil, on doit en réduire la longueur à 20 m. Calculer : a) la force électromotrice; b) la résistance interne de la pile. R : a) 1,8 V; b) 4 Ω .

12. Vingt piles identiques associées en série sont placées en circuit avec un galvanomètre de 8 Ω de résistance et un rhéostat dont la résistance actuelle est de 7 Ω ; le galvanom-

mètre indique un courant de 1 A. On forme un nouveau circuit en disposant les vingt piles en deux séries de dix piles en tension (les séries étant réunies en parallèle), le galvanomètre et le rhéostat dont la résistance est portée à 22Ω , le galvanomètre indique un courant de 0,5 A. Calculer : a) la puissance extérieure à la batterie dans les deux cas; b) la force électromotrice d'une pile; c) la résistance interne d'une pile; d) la valeur à donner à la résistance du circuit extérieur pour que la puissance extérieure soit maximum. R : a) 15 W et 7,5 W; b) 1,75 V; c) 1Ω ; d) ∞ .

13. Aux bornes d'un générateur ($E = 5,6 \text{ V}$ et $r_i = 0,2 \Omega$), on relie un circuit de 200Ω de résistance. Si un galvanomètre de $1\,000 \Omega$ est placé en dérivation sur le circuit, quelle sera l'intensité du courant qui le traversera? R : 0,56 mA.

14. Un générateur ($E = 4 \text{ V}$) de résistance interne négligeable est relié par de gros fils à une cuve à électrolyse. En 10 minutes, il se dégage 30 cm^3 d'hydrogène (mesuré dans les conditions normales). Si on intercale dans le circuit une résistance supplémentaire de 5Ω , il faut 20 minutes pour recueillir le même volume d'hydrogène (mesuré dans les conditions normales). Calculer : a) la résistance de la cuve à électrolyse; b) la force contre-électromotrice de la cuve à électrolyse. R : a) 5Ω ; b) 1,85 V.

15. On dispose d'un générateur de force électromotrice 110 V et de résistance interne 2Ω pour charger 80 accumulateurs identiques ($E' = 2 \text{ V}$; $r_i = 0,04 \Omega$), le courant de charge devant être au maximum 4 A. a) Comment devra-t-on grouper les accumulateurs et quelle résistance supplémentaire doit-on intercaler dans le circuit? b) Quelle sera, dans ces conditions, l'intensité du courant en fin de charge ($E' = 2,5 \text{ V}$)? c) Quelle sera la durée de la charge sachant que chaque accumulateur a une capacité de 20 Ah? d) Quelle sera la durée de la décharge sachant que le rendement des accumulateurs groupés en tension atteint 90 % ($E = 2 \text{ V}$) et que le courant est de 0,3 A? e) Quel est le rendement énergétique de l'opération globale : charge et décharge (rendement énergétique : rapport de l'énergie utile fournie par les accumulateurs à l'énergie totale fournie par le générateur)? R : a) 4,7 Ω ; b) $4/3 \text{ A}$; c) 5 h; d) 60 h; e) 65 %.

16. Un faisceau de rayons cathodiques pénètre entre deux plateaux parallèles distants de 2 cm. Le faisceau, parallèle aux plateaux, parcourt entre ceux-ci une longueur de 10 cm. Lorsque la différence de potentiel entre les deux plateaux est de 6 V, la déviation du faisceau, à la sortie des plateaux, est de 5 mm. La charge et la masse de l'électron étant respectivement $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ u es}$ de charge et 10^{-27} g , calculer la vitesse des particules cathodiques. R : $7 \cdot 10^8 \text{ cm/s}$ ou $7\,000 \text{ km/s}$.

17. Une fine gouttelette d'huile dont le rayon est de 0,001 mm se trouve entre les plateaux horizontaux d'un condensateur plan (n° 198). Pour maintenir la gouttelette immobile malgré son poids, on doit établir entre les deux plateaux distants de 2 cm une différence de potentiel de 2 325 V. Calculer la charge électrique de la gouttelette. (Densité de l'huile : 0,9; $g = 981 \text{ cm/s}^2$). R : $9,54 \cdot 10^{-10} \text{ u es}$.

LECTURE

L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Jusqu'au XIX^e siècle, l'homme n'utilise pas d'autres sources de lumière artificielle que les flammes : flammes des bûches se consumant dans le foyer domestique, flammes fumeuses des torches (cordes tordues enduites de résine), flammes des lampes à huile, flammes des chandelles au suif... Les flammes doivent leur pouvoir éclairant aux particules de carbone portées à haute température.

Dans le cours du XIX^e siècle, l'éclairage au gaz de houille se répand dans les villes. A la suite de l'invention du « manchon à gaz » par Auer (chimiste autrichien : 1858-1929) en 1895, la technique de l'éclairage au gaz réalise un très sensible progrès. Le manchon Auer est une cloche en tissu imprégné de sels de métaux rares (thorium et cérium) qui coiffe la flamme incolore d'un

bec à combustion complète : portés à haute température, les oxydes de thorium et de cérium rayonnent une lumière blanche intense.

La fin du XIX^e siècle voit se lever l'aube de l'éclairage électrique.

Lampe à incandescence. — Les premières lampes électriques sont inventées en 1879 par Swann en Angleterre, par Edison aux Etats-Unis. Le courant électrique porte à l'incandescence, par effet Joule, un filament

dont le rayonnement dépend exclusivement de la température à laquelle il est porté. A 800° C, l'énergie rayonnée se cantonne surtout dans l'infrarouge; l'énergie rayonnée dans le rouge est toutefois suffisante pour que le filament apparaisse rouge. A 3000° C, l'énergie rayonnée s'échelonne de l'infrarouge à l'ultra-violet au point que le filament apparaît presque blanc (fig. 274).

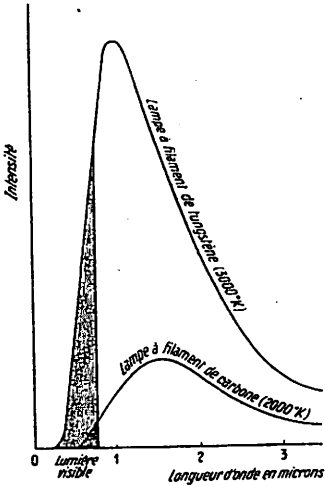


Fig. 274.

Le problème de l'éclairage électrique par incandescence consiste à trouver une substance telle que, sous forme de filament, elle puisse être portée à 3000° C sans subir ni fusion, ni évaporation, ni oxydation.

Les premières lampes à incandescence sont constituées d'une ampoule en verre rigoureusement vide d'air dans laquelle un filament de carbone, relativement fragile, est porté à la température de 2000° K par le courant électrique. Le rendement en lumière rouge est médiocre.

Au filament de carbone, on substitue en 1910 le filament de tungstène, le plus réfractaire des métaux (température de fusion : 3380° C), que le courant électrique porte à la température de 3000° K : le rendement en lumière est considérablement amélioré. Toutefois, la lampe au tungstène présente un inconvénient : dans le vide, le métal s'évapore et se dépose, sous forme d'enduit noirâtre, sur la paroi froide de l'ampoule.

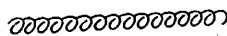
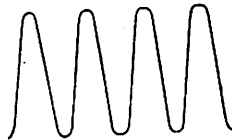


Fig. 275.

En 1915, le savant américain Langmuir fait breveter une lampe à filament de tungstène placé dans une atmosphère de gaz inerte (argon, hélium) afin d'éviter la volatilisation du métal. On utilise successivement, dans le but d'augmenter le rendement, le filament simplement étiré, le filament spiralé, le filament doublement spiralé (fig. 275). On imagine enfin, afin d'éviter l'éblouissement, de fabriquer l'ampoule en verre dépoli.

Les lampes à incandescence actuelles sont constituées d'un filament doublement spiralé plongé dans une atmosphère de gaz inerte que renferme une ampoule en verre dépoli.

Tube fluorescent. — Cependant, la lampe à incandescence cède de plus en plus de terrain aux tubes fluorescents.

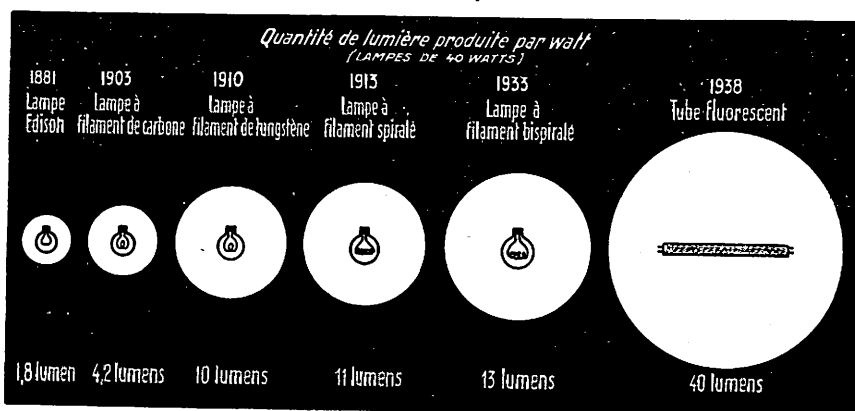


Fig. 276. — Évolution de la lampe électrique.

Le tube fluorescent est un tube en verre rempli d'argon; il renferme quelques gouttelettes de mercure; il porte à ses extrémités deux filaments de tungstène formant électrodes. Quand la décharge électrique se produit dans l'atmosphère argon-vapeur mercurielle, elle engendre une pauvre lumière visible mais une abondante lumière ultra-violette (longueur d'onde : 2537 Å). Cette lumière ultra-violette, invisible à l'œil, est absorbée par la mince couche de substance fluorescente qui tapisse la paroi interne du tube. Soumise aux radiations ultra-violettes, la substance fluorescente émet de la lumière visible dont la couleur est rose, verte, bleue selon que la substance fluorescente est le borate de cadmium, le silicate de zinc, le tungstate de magnésium. Pour obtenir la lumière blanche, on enduit la paroi interne du tube d'un mélange de plusieurs poudres fluorescentes.

Relativement à la lampe à incandescence, le tube fluorescent présente des avantages marqués :

a) un meilleur rendement lumineux (40 lumens par watt pour le tube fluorescent contre 13 lumens par watt pour la lampe à incandescence (fig. 276);

b) une durée de vie double ou triple;

c) une sensible diminution de la fatigue de l'œil due à l'énorme différence des surfaces lumineuses.

Pour amorcer la décharge électrique dans le tube fluorescent, deux accessoires, le starter et le ballast, logés dans la monture du tube sont nécessaires. La mise sous tension (110 V à 220 V) ne produit pas immédiatement la décharge électrique dans le tube : à la température ambiante, le mercure s'y trouve sous forme de gouttelettes. Appliquée intégralement aux bornes A et B du starter, la tension provoque la décharge électrique à travers le néon (fig. 277). Conséquence du passage de la décharge électrique dans le starter, le néon et la borne B s'échauffent. Or, la borne B est constituée de deux lames de métaux différents accolées l'une sur l'autre. A cause de la différence entre les coefficients de dilatation linéaire des deux métaux, la

courbure de la borne B diminue. La borne B vient au contact de la borne A : le starter est court-circuité. Dès lors, le courant d'intensité élevée qui passe dans le circuit porte au rouge les électrodes E_1 et E_2 en filament spiralé. Effet thermoélectronique : les électrodes E_1 et E_2 émettent des électrons.

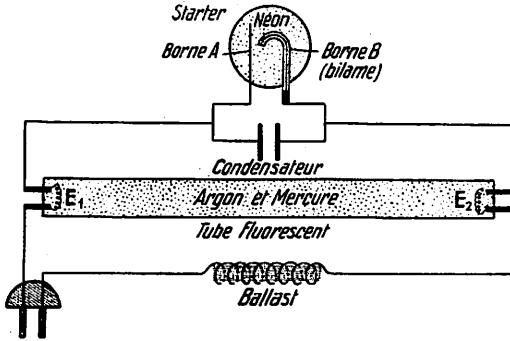


Fig. 277.

Soumis à l'action du champ électrique régnant dans le tube, les électrons entrent en collision avec les molécules d'argon et les molécules de mercure : ionisé, le gaz du tube est conducteur. Entretemps, la borne B du starter s'est refroidie : le contact entre les bornes A et B du starter est rompu. La brusque interruption du courant dans le starter crée dans le ballast, solénoïde à noyau en fer doux, une brusque élévation de la tension (effet d'induction) : la décharge électrique se produit entre les électrodes E_1 et E_2 à travers l'atmosphère argon-vapeur mercurielle. A la suite de la décharge électrique, la tension entre les électrodes E_1 et E_2 diminue : elle est suffisante pour assurer les décharges dans le tube mais insuffisante pour provoquer des décharges dans le starter.

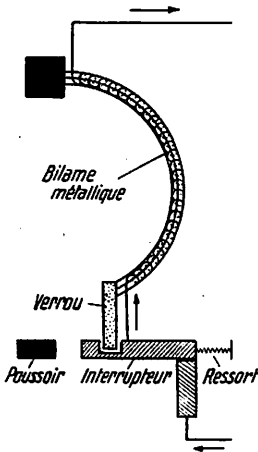


Fig. 278.

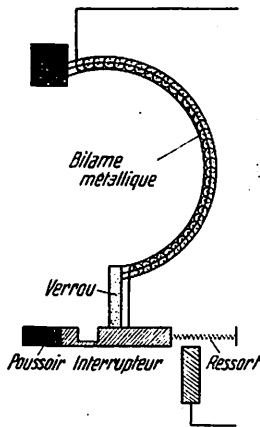


Fig. 279.

Disjoncteur à maxima. — Les circuits d'éclairage sont généralement protégés par des fusibles constitués d'un fil d'argent : lorsque l'intensité du

courant dépasse dans le circuit une valeur fixée d'avance, le fusible, en fondant, ouvre le circuit. Cependant, la sécurité est illusoire avec les fusibles « fraudés » c'est-à-dire avec les fusibles où un fil de cuivre ou de fer de section quelconque a été substitué au fil d'argent mis hors d'usage à la suite d'une surcharge dans le circuit. Aussi remplace-t-on actuellement les fusibles par un disjoncteur à maxima (teco, disruptor) qui ne peut être fraudé.

Le disjoncteur à maxima comporte un relai thermique et un relai magnétique :

a) Le relai thermique est constitué d'une lame bimétallique autour de laquelle est bobinée une résistance ou d'une lame bimétallique qui joue le rôle de résistance (fig. 278). Le passage du courant élève la température de la bilame : il s'ensuit une variation de courbure de la bilame qui, si elle est exagérée, libère le verrou de l'interrupteur. Dès lors, le ressort déclenche l'interrupteur (fig. 279).

Le relai thermique agit lentement : en effet, il faut que la bilame se dilate. Si l'intensité du courant atteint brusquement une valeur élevée, tous les

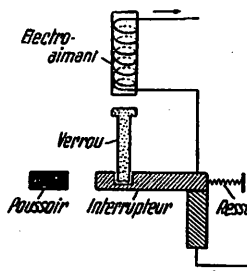


Fig. 280.

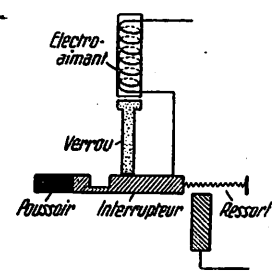


Fig. 281.

appareils branchés seraient brûlés avant que joue le relai thermique : aussi, pour le cas où se produit brutalement une forte surcharge, le relai thermique est doublé d'un relai magnétique.

b) Le relai magnétique est constitué d'une bobine de quelques spires et d'un noyau en fer doux (fig. 280). La succion du noyau en fer doux dans le solénoïde parcouru par un courant de grande intensité libère le verrou de l'interrupteur que déclenche le ressort (fig. 281).

Le relai magnétique agit dès que se produit la surcharge.

Lorsque le disjoncteur a déclenché, on rétablit le contact en poussant sur un bouton ou en relevant une manette. Toutefois, si la cause qui a produit le déclenchement de l'interrupteur persiste, le verrou de l'interrupteur ne reste pas à la place qui lui est ordinairement assignée; le contact ne peut être rétabli que lorsque la cause qui a provoqué le déclenchement du disjoncteur a cessé.

CHAPITRE III.

MAGNÉTISME.

§ 1. PROPRIÉTÉS DES AIMANTS.

217. AIMANTS. — On trouve dans la nature un minerai de fer (Fe_3O_4) qui possède la propriété remarquable d'attirer la limaille de fer. Ce minerai constitue l'aimant naturel. Par des frictions répétées de l'aimant naturel sur un morceau d'acier, ce dernier acquiert les propriétés de l'aimant naturel : on obtient ainsi un aimant artificiel. On n'utilise plus que des aimants artificiels, obtenus d'ailleurs par un procédé que nous étudierons en Electromagnétisme (n° 252). On donne aux aimants la forme de barreau (parallépipède rectangle)

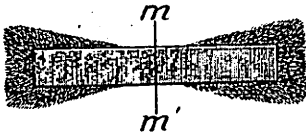


Fig. 282.

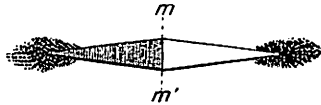


Fig. 283.

(fig. 282), de fer à cheval (fig. 295), d'anneau (fig. 298), d'aiguille (lame mince taillée en losange allongé) (fig. 283). Les aimants n'attirent pas seulement le fer mais encore le nickel, le cobalt et le chrome. On a donné le nom de corps magnétiques aux métaux attirés par l'aimant et le nom de magnétisme à la cause de cette attraction.

218. DISTINCTION DES DEUX POLES D'UN AIMANT.

Expériences. — 1. Plongeons un aimant dans la limaille de fer, nous observons que les deux extrémités de l'aimant fixent la limaille en houppes épaisses tandis que la région médiane mm' de l'aimant ne retient pas la limaille (fig. 282 et 283).

2. Une aiguille aimantée, mobile dans un plan horizontal autour d'un axe vertical, prend sensiblement la direction Nord-Sud (fig. 284). Ecartons l'aiguille de sa position et abandonnons-la ensuite à elle-même : l'aiguille revient, après quelques oscillations, à sa position initiale. Faisons tourner l'aiguille de 180° et abandonnons-la ensuite à elle-même : l'aiguille revient à sa position initiale de manière à diriger toujours la même extrémité vers le Nord et la même extrémité vers le Sud.

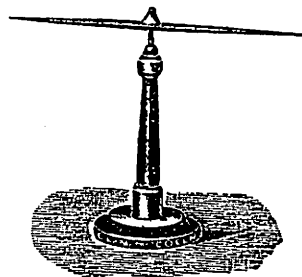


Fig. 284.

Conclusion. — La force attractive de l'aimant se localise aux extrémités de l'aimant; ces extrémités sont appelées pôles de l'aimant.

Ces deux pôles ne sont pas identiques : le pôle qui se dirige vers le Nord est appelé **pôle Nord**, le pôle qui se dirige vers le Sud est appelé **pôle Sud**. (La moitié nord de l'aiguille est généralement teinte en bleu foncé.)

219. ACTION RÉCIPROQUE DES POLES D'AIMANT.

de la loi qualitative des actions magnétiques.

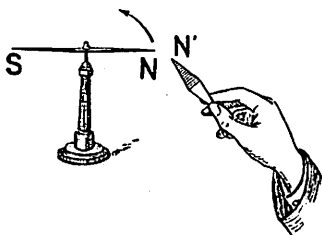


Fig. 285.

Expériences. — 1. Approchons du pôle Nord N d'une aiguille mobile le pôle Nord N' d'une autre aiguille : nous observons une vive répulsion (fig. 285). Nous observerions le même phénomène avec les pôles Sud.

2. Présentons au pôle Nord N de l'aiguille mobile le pôle Sud S' de la seconde aiguille : nous constatons une vive attraction.

Conclusion. — Les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.

220 IMPOSSIBILITÉ D'ISOLER UN POLE D'AIMANT. —

La dualité manifestée par les pôles d'un aimant nous oblige à distinguer deux espèces de magnétisme : le magnétisme Nord et le magnétisme Sud. Pouvons-nous isoler les deux espèces de magnétisme en brisant en son milieu une longue aiguille aimantée ?

Expérience. — Sectionnons en son milieu une aiguille à tricoter aimantée NS; nous constatons que chacun des tronçons constitue un aimant complet, deux pôles de noms contraires apparaissent au point de rupture (fig. 286). Sectionnons chacun des deux aimants, nous obtenons quatre aimants complets. Nous obtenons toujours le même résultat aussi loin que nous poussons la division de l'aiguille aimantée.

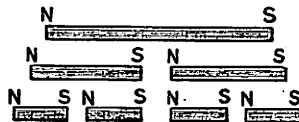


Fig. 286.

Conclusion. — Il semble donc que nous ne puissions isoler une seule espèce de magnétisme.

L'expérience de l'aimant brisé nous fait concevoir une aiguille aimantée comme formée d'aimants élémentaires, très petits, disposés bout à bout et réunis par les pôles de noms contraires (fig. 286). Dans ce filet magnétique, les pôles en contact neutralisent leurs actions, les pôles des extrémités sont seuls efficaces; tout se passe donc comme si ces pôles existaient seuls. En groupant plusieurs filets magnétiques parallèlement entre eux de façon que leurs extrémités Nord soient

d'un même côté et leurs extrémités Sud de l'autre côté, nous constituons un aimant. D'après la loi de répulsion des pôles de même nom, les extrémités des filets se repoussent mutuellement et les filets prennent la forme incurvée de la figure 287 dans laquelle les lignes en traits interrompus représentent des filets magnétiques.

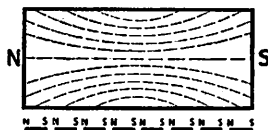


Fig. 287.

Influence
221. INDUCTION MAGNÉTIQUE.

Expérience. — Disposons dans le voisinage d'un aimant un barreau de fer doux (un clou, par exemple), ce barreau attire la limaille de fer, exerce une action sur une aiguille aimantée (fig. 288). Sous l'influence de l'aimant, le barreau s'est lui-même aimanté. Il nous est aisé de remarquer que les pôles voisins des deux aimants sont de noms contraires (fig. 288). Interposons entre l'aimant et le barreau de fer doux un écran en verre, en carton, en cuivre, ... le barreau reste aimanté. Écartons l'aimant du barreau de fer doux, le barreau n'attire plus la limaille de fer, n'exerce plus d'action sur une aiguille aimantée : il est désaimanté.

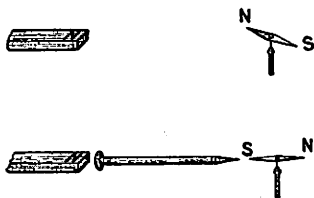


Fig. 288.

Conclusion. — Un corps magnétique soumis à l'influence d'un aimant s'aimante. Ce phénomène d'aimantation par influence est connu sous le nom d'induction magnétique.

222. MASSES MAGNÉTIQUES.

Capacité de magnétisation

Expériences. — 1. Sur l'un des plateaux d'une balance sensible, disposons une longue aiguille aimantée A et faisons la tare. Sous le pôle Nord N de

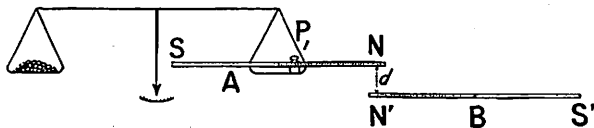


Fig. 289.

cette aiguille, amenons, à une distance d , le pôle Nord N' d'une longue aiguille aimantée B (fig. 289). Pour maintenir l'équilibre de la balance, nous devons placer un poids P_1 sur le plateau supportant l'aiguille A. Ce poids mesure la force de répulsion des pôles N et N' à la distance d ; l'influence des pôles S et S' est en effet négligeable à cause de leur éloignement.

Substituons à l'aiguille B une aiguille C de manière que son pôle Nord N'' se trouve à la même distance d sous le pôle Nord N de l'aiguille A. La répulsion est mesurée, cette fois, par un poids P_2 . Si P_2 est égal à $2P_1$, nous disons

que le pôle N'' ayant, toutes autres choses égales, une action double du pôle N' possède une quantité de magnétisme ou une masse magnétique double de celle du pôle N'.

2. Amenons simultanément sous le pôle Nord N de l'aiguille A les pôles N' et N'' des aiguilles B et C, la force de répulsion P₃ est telle que P₃ est égale à la somme P₁ + P₂. Nous pourrions donc remplacer l'effet simultané des pôles N' et N'' par un pôle unique dont la masse magnétique serait égale à la somme des masses magnétiques des pôles N' et N''.

Substituons le pôle Sud S' au pôle Nord N', nous constatons une force de répulsion P₄ telle que P₄ est égale à la différence P₂ - P₁. Les pôles N'' et S' pourraient donc être remplacés par un pôle unique dont la masse magnétique serait égale à la différence des masses magnétiques des pôles N'' et S'.

Conclusion. — Les masses magnétiques sont susceptibles d'addition. Par convention, nous affecterons le magnétisme Nord du signe positif et le magnétisme Sud du signe négatif.

223. UNITÉ DE MASSE MAGNÉTIQUE. — L'unité de masse magnétique, dans le système C. G. S., est la masse magnétique qui, placée dans le vide à un centimètre de distance d'une masse magnétique identique, la repousse avec une force d'une dyne.

quantitative des masses magnétiques
224. LOI DE COULOMB. — En utilisant une balance de torsion, Coulomb a montré que la force d'attraction ou de répulsion entre deux masses magnétiques, dirigée selon la droite qui les joint, est : a) directement proportionnelle aux masses magnétiques m et m' en présence; b) inversement proportionnelle au carré de la distance d qui sépare ces masses.

La loi de Coulomb s'exprime donc par la relation :

$$F = \pm \frac{1}{\mu} \cdot \frac{mm'}{d^2}$$

μ est un facteur de proportionnalité, appelé perméabilité magnétique, qui dépend de la nature du milieu séparant les masses magnétiques. Il résulte de la définition de l'unité de masse magnétique que, dans le vide, le facteur μ est égal à 1. Le facteur μ a sensiblement cette même valeur dans tous les milieux non magnétiques.

225. ÉGALITÉ DES MASSES MAGNÉTIQUES DES POLES D'UN AIMANT.

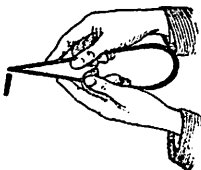


Fig. 290.

Expérience. — Replions une longue aiguille aimantée très flexible dont le pôle Nord soutient une tige de fer de façon à superposer le pôle Sud au pôle Nord : la tige de fer se détache (fig. 290).

Conclusion. — Les masses magnétiques des pôles d'un aimant sont égales en valeur absolue mais de signes contraires.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un pôle Nord de masse magnétique 20 unités est situé à 2 cm d'un pôle Sud de masse magnétique 30 unités. Calculer la force exercée par ces pôles dans l'air.

SOLUTION. — La relation de Coulomb donne

$$F = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{mm'}{d^2}; \quad F = 1 \cdot \frac{20 \cdot (-30)}{2^2} = -150 \text{ dyn (force d'attraction).}$$

2. On sectionne exactement en son milieu une longue aiguille aimantée. On dispose parallèlement l'une à l'autre à 5 cm de distance les deux aiguilles aimantées, les pôles de même nom en regard. La force de répulsion d'une aiguille sur l'autre est de 200 dyn. a) Calculer la masse magnétique de chacun des pôles. b) On retourne l'une des aiguilles bout à bout; que se passe-t-il ?

SOLUTION. — La force de répulsion entre les pôles Nord des deux aiguilles aimantées est de 100 dyn. Par application de la relation de Coulomb, on obtient :

$$m^2 = F \cdot d^2; \quad m^2 = 100 \cdot 5^2; \quad m = 50.$$

La masse magnétique de chacun des pôles est donc de 50 unités C. G. S.

b) Le pôle Nord d'une aiguille attire le pôle Sud de l'autre avec une force de :

$$F = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{mm'}{d^2}; \quad F = 1 \cdot \frac{50 \cdot (-50)}{5^2} = -100 \text{ dyn.}$$

Les deux aiguilles s'attirent donc avec une force de 200 dyn.

1) Intensité du ch. magnétique
2) Ligne de force
3) Sens et l'une ligne de force.

§ 2. CHAMP MAGNÉTIQUE.

226. NOTION DE CHAMP MAGNÉTIQUE. — Il résulte de la loi de Coulomb qu'un aimant exerce une action sur toute masse magnétique située dans son voisinage. La région de l'espace dans laquelle un aimant exerce une influence est le siège d'un **champ magnétique** de cet aimant. Mais l'influence exercée par l'aimant varie d'un point à l'autre du champ magnétique. Pour caractériser l'influence de l'aimant en un point A, on imagine qu'une masse magnétique + 1 soit placée en ce point; elle y serait soumise à une force dont la direction, le sens et l'intensité donnent, par définition, la direction, le sens et l'intensité du champ magnétique au point A (fig. 291). L'intensité du champ magnétique H en un point se détermine en mesurant la force F exercée sur une masse magnétique m placée en un point

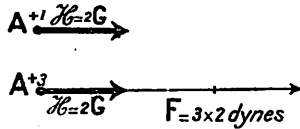


Fig. 291.

$$H = \frac{F}{m}$$

Le champ magnétique est une grandeur vectorielle.

227. UNITÉ D'INTENSITÉ DE CHAMP MAGNÉTIQUE. — L'intensité de champ magnétique s'exprime en œrsteds (Oe) du nom d'œrsted (physicien danois : 1777-1851). L'intensité d'un champ magnétique en un point est d'un œrsted si l'unité de masse magnétique y est sollicitée par une force d'une dyne (1).

(1) On utilise très souvent le gauss comme unité d'intensité de champ magnétique.

282. LIGNES DE FORCE. — Supposons qu'une masse magnétique $+ 1$ puisse se déplacer librement dans un champ magnétique : elle s'y déplacerait en suivant en chaque point la direction du vecteur champ en ce point. La trajectoire décrite par l'unité de masse magnétique est une **ligne de force** du champ magnétique. Le vecteur champ est, en tout point, tangent à la ligne de force. Le sens d'une ligne de force est, par convention, défini par le sens selon lequel se déplacerait un pôle Nord.

229. CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN POLE.

Raisonnement. — Le champ magnétique créé par un pôle isolé

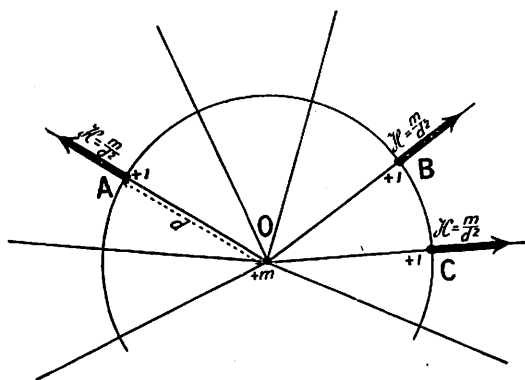


Fig. 292.

de masse magnétique $+ m$ peut être prévu par un raisonnement analogue à celui du champ électrique créé par une charge ponctuelle $+ q$ (n° 103). Les lignes de force du champ magnétique sont des droites issues du pôle et rayonnantes dans toutes les directions (fig. 292). L'intensité du champ diminue tout le long de

ces lignes de force à mesure que l'on s'éloigne du pôle O.

$$H = \frac{m}{d^2}$$

Si nous remplaçons la masse magnétique $+ m$ par la masse magnétique $- m$, le champ conserve en chaque point la même direction et la même intensité mais le sens est inversé.

Vérification expérimentale. — Posons horizontalement une feuille de carton sur le pôle Nord d'un long barreau aimanté maintenu verticalement. Le champ magnétique qui règne dans le plan du carton est dû à peu près exclusivement au pôle Nord, l'éloignement du pôle Sud rendant l'influence de ce dernier pratiquement nulle. Nous avons ainsi réalisé les conditions du cas que nous venons d'étudier théoriquement. Pour rendre visibles les lignes de force, un premier moyen consiste à disposer sur le carton une série de petites aiguilles aimantées posées sur pivot. Chaque aiguille s'orientera dans la direction du champ. L'ensemble des aiguilles orientées forme, en quelque sorte, un dessin des lignes de force (fig. 293).

Un second moyen d'explorer le champ consiste à saupoudrer le carton de limaille de fer. Chaque grain de limaille, aimanté par influence, s'orientera

suivant le champ. La limaille de fer forme de longs filaments qui matérialisent les lignes de force (fig. 293). L'ensemble des lignes de force matérialisées par la limaille de fer constitue le **spectre magnétique**.

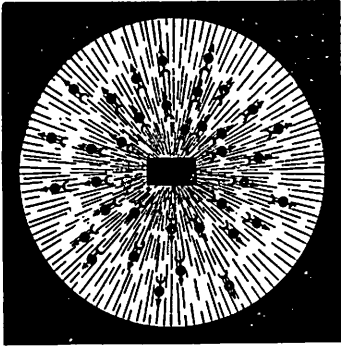


Fig. 293.

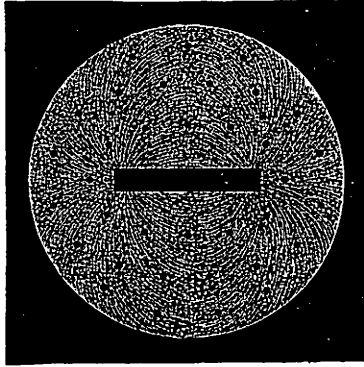


Fig. 294.

230. SPECTRES MAGNÉTIQUES.— L'étude du champ magnétique au moyen de la limaille de fer est particulièrement aisée. La figure 294 représente le spectre magnétique d'un barreau aimanté. Les lignes de force sont des courbes issues du pôle Nord et aboutissant au pôle Sud. Nous admettrons qu'elles se ferment à l'intérieur

de l'aimant en allant du pôle Sud au pôle Nord. La forme de ces lignes de force s'explique facilement en considérant l'action des pôles Nord et Sud de l'aimant sur une masse magnétique.

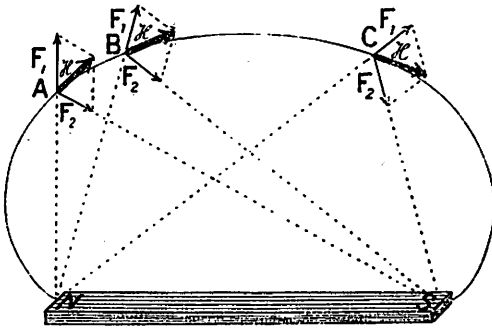


Fig. 295.

par le pôle Sud sur la masse magnétique + 1 placée au point A (fig. 295). Au point B la direction du champ a varié, la grandeur et la direction des forces exercées par les pôles ayant changé.

Les figures 296 et 297 représentent les spectres magnétiques d'un aimant en forme de fer à cheval. Les lignes de force semblent s'accumuler entre les deux pôles (région de l'espace où le champ est le plus intense); elles y constituent pratiquement des droites parallèles.

Remarques. — 1. Le spectre magnétique nous renseigne sur le champ dans un plan. En réalisant le spectre dans divers plans autour d'un aimant, nous pouvons nous représenter le champ dans l'espace.



Fig. 296.

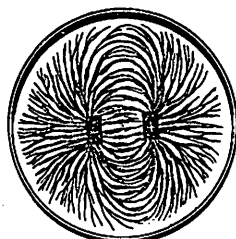


Fig. 297.

2. Le spectre magnétique ne donne aucune indication sur l'intensité du champ. Cependant, les lignes de force matérialisées par la limaille de fer apparaissent plus serrées dans la région où le champ est le plus intense.

231. CHAMP UNIFORME. — Si, dans un espace donné, les lignes de force sont parallèles et si l'intensité du champ y est constante, le champ est dit uniforme.

Pour obtenir un champ uniforme très intense, on utilise un aimant annulaire (fig. 298). L'espace entre les deux pôles, qu'on appelle entre-fer, est le siège d'un champ intense et uniforme.

Dans un champ uniforme, une aiguille aimantée est soumise à un

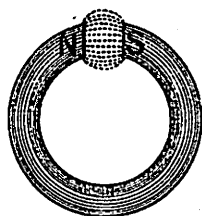


Fig. 298.

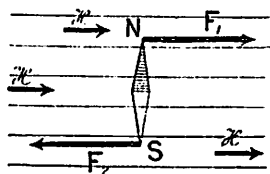


Fig. 299.

couple de forces qui tend à l'orienter mais non à la déplacer (fig. 299). En effet, la force F_1 exercée sur le pôle Nord de l'aiguille ($F_1 = + mH$) est égale et de sens contraire à la force F_2 exercée sur le pôle Sud de l'aiguille ($F_2 = - mH$). L'aiguille sera en équilibre lorsque l'axe de l'aiguille sera orienté dans la direction du champ.

232. CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE. — Nous avons vu qu'une aiguille aimantée située dans le voisinage de la Terre s'oriente, en l'absence d'aimant, dans une direction sensiblement voisine de la direction Nord-Sud (n° 218). Nous en concluons qu'il existe autour de la Terre un champ magnétique.

I. Expérience. — Abandonnons à elle-même une aiguille aimantée mobile dans tous les sens (fig. 300) : cette aiguille s'oriente sensiblement dans le plan du méridien géographique en s'inclinant fortement sur l'horizon, le pôle Nord dirigé vers le sol. Répétons cette expérience en divers endroits d'un espace restreint, nous constatons que la direction de l'aiguille ne varie pas.

Conclusion. — Les lignes de force du champ magnétique terrestre sont, en un lieu, des droites parallèles obliques.

II. Expériences. — 1. Un aimant posé sur un bouchon flottant à la surface d'une nappe d'eau tranquille fait tourner le bouchon sur lui-même pour s'orienter mais ne lui imprime aucun mouvement de translation. L'action magnétique terrestre n'a donc pas de composante horizontale.

2. Le poids d'un barreau d'acier ne varie pas par l'aimantation. L'action magnétique terrestre n'a donc pas de composante verticale.

Conclusion. — L'action magnétique terrestre sur une aiguille aimantée est uniquement une action de direction; elle se réduit, par conséquent, à un couple de forces appelé couple terrestre. Le champ magnétique terrestre en un lieu donné est donc uniforme.

La valeur du champ magnétique terrestre est dans nos régions de 0,467 Oe. Nous étudierons avec plus de détails le champ magnétique terrestre en Physique terrestre.

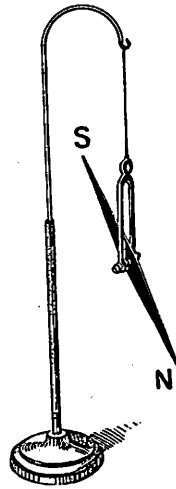


Fig. 300.

233. AIGUILLE ASTATIQUE. — En réunissant parallèlement

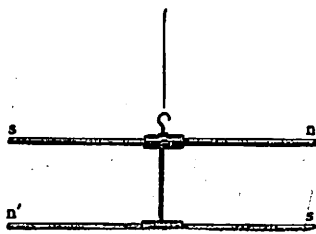


Fig. 301.

deux aiguilles aimantées identiques (même longueur, mêmes masses magnétiques aux pôles), les pôles de noms contraires en regard, on réalise un système astatique c'est-à-dire un système soustrait à l'action directrice de la Terre (fig. 301). En effet, le couple de forces exercé sur une aiguille est exactement égal et contraire au couple de forces exercé sur l'autre aiguille.

234. FLUX DE FORCE. — Considérons une surface S placée perpendiculairement aux lignes de force d'un champ magnétique uniforme d'intensité H (fig. 302). Nous appellerons flux de force magnétique \mathcal{F} à travers la surface S le produit de la surface S par l'intensité H du champ.

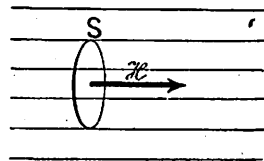


Fig. 302.

$$\mathcal{F} = HS$$

Si la surface S n'est pas normale aux lignes de force du champ (fig. 303), le flux de force magnétique s'exprime par la relation :

$$\mathcal{F} = HS \cos \alpha$$

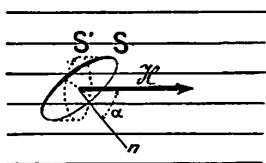


Fig. 303.

α étant l'angle que fait avec le champ H la normale n à la surface S . Le produit $S \cdot \cos \alpha$ représente la projection S' de la surface S sur le plan normal au champ. Nous voyons que le flux représente la quantité de champ (ou de lignes de force) qui traverse la surface considérée.

235. UNITÉ DE FLUX. — Le flux de force magnétique s'exprime en **Maxwells (Mx)**, du nom de Maxwell (physicien anglais : 1831-1879) lorsque la surface est exprimée en centimètres carrés et le champ en oersteds.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un aimant NS a 20 cm de longueur ; la masse magnétique de chacun de ses pôles est 500 unités C. G. S. Calculer l'intensité du champ magnétique en un point A également distant des pôles N et S , l'angle NAS étant droit (fig. 304).

SOLUTION. — La masse magnétique $+1$ placée en A est repoussée avec une force F_1 qui vaut :

$$F_1 = \frac{mm'}{d^2}; \quad F_1 = \frac{500 \cdot 1}{AN^2} = \frac{500 \cdot 1}{200} = 2,5 \text{ dyn}$$

et est attirée avec une force F_2 qui vaut

$$F_2 = \frac{mm'}{d^2}; \quad F_2 = \frac{(-500) \cdot 1}{AS^2} = \frac{(-500) \cdot 1}{200} = -2,5 \text{ dyn}$$

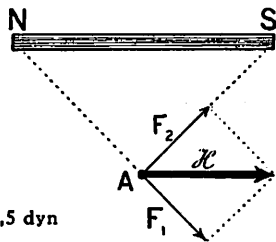


Fig. 304.

La résultante de ces forces, qui est représentée par la diagonale du carré construit sur les deux forces composantes, vaut $\sqrt{12,5 \text{ dyn}}$ ou $3,6 \text{ dyn}$. Le champ qui règne en A vaut donc $3,6 \text{ Oe}$.

2. Calculer le flux magnétique à travers un cadre rectangulaire, dont les côtés sont 23 cm et 10 cm, disposé perpendiculairement aux lignes de force d'un champ magnétique uniforme de $0,5 \text{ Oe}$. Que devient le flux magnétique à travers le même cadre incliné de 60° par rapport à sa première position ?

SOLUTION. — a) Le flux magnétique vaut :

$$\mathcal{F} = HS; \quad \mathcal{F} = 0,5 \cdot 250 = 125 \text{ Mx.}$$

b) Le flux magnétique devient :

$$\mathcal{F} = HS \cos \alpha; \quad \mathcal{F} = 0,5 \cdot 250 \cdot 0,5 = 62,5 \text{ Mx.}$$

Le flux magnétique est donc diminué de moitié.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Dans un plan sont tracés deux axes de coordonnées rectangulaires gradués en centimètres. Un aimant placé sur le plan a son pôle Nord aux coordonnées : $x = 4$ et $y = 0$ et son pôle Sud aux coordonnées : $x = 0$ et $y = -4$. La masse magnétique polaire est 50.

Déterminer la direction et l'intensité du champ magnétique aux points : a) $x = 0$ et $y = 0$,
 b) $x = -3$ et $y = -7$; c) $x = 2$ et $y = -2$. R : a) 4,375 Oe; b) $\left(\frac{50}{18} - \frac{50}{98}\right)$ Oe;
 c) $\frac{100}{8}$ Oe.

2. Une très petite aiguille aimantée mobile dans le plan horizontal est orientée suivant la composante horizontale du champ magnétique terrestre ($H_f = 0,2$ Oe). Sur la droite OX, perpendiculaire à l'axe de l'aiguille en équilibre menée à partir du centre O de l'aiguille, on place, à 80 cm de l'aiguille, le pôle Nord d'un long barreau aimanté. L'aiguille aimantée tourne d'un angle de 5° . On demande la masse magnétique des pôles du barreau. Si on approche ensuite le pôle Nord à 60 cm de l'aiguille, quelle sera la déviation de l'aiguille? L'influence du pôle Sud est négligeable. R : a) 112; b) 9° .

3. On remplace le long barreau aimanté de l'exercice précédent par un aimant de 10 cm de longueur disposé suivant la droite OX. Pour produire une déviation de l'aiguille de 5° , on doit placer l'aimant de manière que le pôle Nord soit à 30 cm de l'aiguille et que le pôle Sud soit à 40 cm de l'aiguille. a) Déterminer la masse magnétique des pôles de l'aimant; b) chercher l'équation qui exprime la déviation α en fonction de la distance d séparant l'aiguille du centre du barreau glissant sur la droite OX. R : a) 36; b) $\text{tg } \alpha = \frac{3600}{(d^2 - 25)^2}$

4. Quel est le flux total émis par un long barreau aimanté portant à chaque pôle 200 unités de magnétisme? (On décrit une sphère d'un centimètre de rayon ayant pour centre le pôle Nord, on cherche la valeur du champ sur un point de cette sphère et on multiplie par la surface de cette sphère). R : $F = 800 \pi \text{ Mx}$.

CHAPITRE IV.

ÉLECTROMAGNÉTISME.

L'Electromagnétisme étudie l'action réciproque des courants et des aimants et les applications particulièrement importantes qui en découlent.

§ 1. CHAMP MAGNÉTIQUE DES COURANTS.

✕ 236. EXPÉRIENCE D'ØRSTED.

L'action d'un courant sur un aimant (n° 138), découverte par Ørsted est à la base de l'Electromagnétisme. Nous avons vu qu'une aiguille aimantée orientée, disposée parallèlement à un fil métallique, s'écarte de sa position d'équilibre lorsque le fil est parcouru par un courant (fig. 190). La déviation de l'aiguille, qui est fonction du sens du courant (fig. 190 et 191), cesse dès que le courant est interrompu (fig. 189).

Ces expériences prouvent qu'un courant électrique crée autour de lui un champ magnétique.

237. CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN COURANT RECTILIGNE.

1. Forme des lignes de force. — Expérience. — Faisons passer à travers une feuille de carton disposée horizontalement un fil vertical

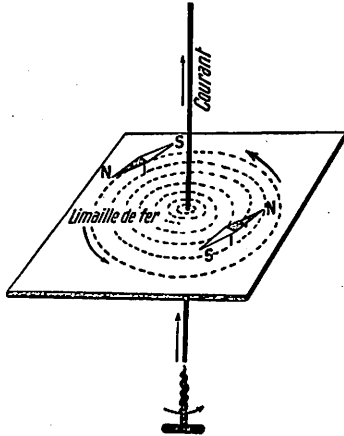


Fig. 305.

horizontalement un fil vertical parcouru par un courant d'une dizaine d'ampères et saupoudrons le carton de limaille de fer. Les grains de limaille s'orientent selon des circonférences concentriques dont le centre est le point de percée du fil (fig. 305).

Conclusion. — Les lignes de force du champ magnétique produit par un courant rectiligne sont des circonférences concentriques contenues dans un plan perpendiculaire à la direction du courant.

2. Sens des lignes de force. — Expérience. — Disposons sur la

feuille de carton une petite aiguille aimantée : le sens sud-nord de cette aiguille indique le sens des lignes de force. Le sens des lignes de force est conforme à la règle suivante :

Règle de Maxwell. — Un tire-bouchon progressant le long du conducteur dans le sens du courant tourne dans le sens des lignes de force. Réciproquement, un tire-bouchon tourne dans le sens des lignes de force progresse le long du conducteur dans le sens du courant.

*3. Intensité du champ magnétique en un point. Loi de Laplace (illustre mathématicien français : 1749-1827). — Considérons un élément ab , de longueur l , du conducteur rectiligne XY parcouru par un courant d'intensité I (fig. 306). Considérons également un point P situé sur la perpendiculaire élevée du centre O de l'élément ab , à une distance d de ce centre O . L'élément de courant ab produit au point P un champ h qui, en vertu de la règle de Maxwell, est perpendiculaire au plan formé par l'élément ab et le point P . L'intensité de ce champ h est donnée par la relation de Laplace :

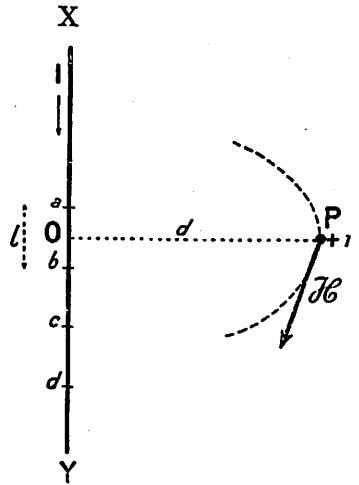


Fig. 306.

$$h = k \frac{I l}{d^2}$$

k étant un coefficient de proportionnalité dépendant des unités choisies.

Pour connaître le champ H produit au point P par le courant rectiligne indéfini XY, il faut additionner les champs h produits par chacun des éléments de courant ab, bc, cd, \dots qui composent le conducteur XY. Le calcul, dont le détail dépasse le cadre de ce cours, donne :

$$H = k \frac{2I}{d}$$

238. CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN COURANT CIRCULAIRE.

1. **Forme des lignes de force.** — Le spectre magnétique d'un courant circulaire, obtenu par la méthode ordinaire, est représenté par la figure 307.

2. **Sens des lignes de force.** — La règle du tire-bouchon montre que les lignes de force à l'intérieur de la spire ont toutes le même sens. Les lignes de force sortent par une des faces de la spire, appelée **face Nord**, s'épanouissent dans l'espace et rentrent par l'autre face, appelée **face Sud**. Le courant circulaire, qui produit un spectre magnétique analogue à celui d'un disque aimanté, constitue un **feuillet magnétique**.

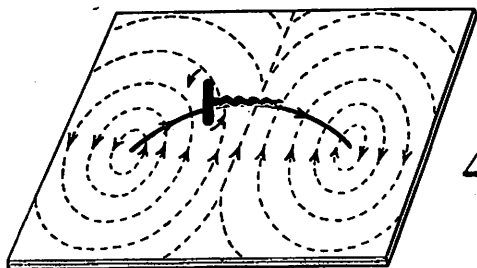


Fig. 307.

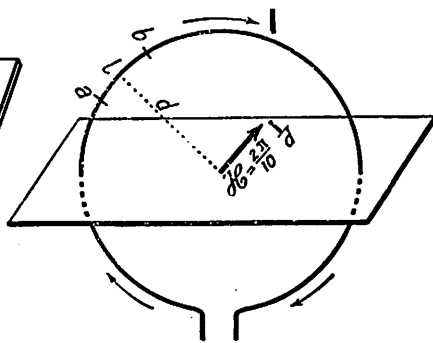


Fig. 308.

*3. **Intensité du champ magnétique au centre du courant circulaire.** — Chaque élément de longueur l du courant circulaire produit au centre de la spire un champ magnétique h perpendiculaire au plan de la spire (fig. 308). Ce champ h vaut (formule de Laplace) :

$$h = k \frac{Il}{d^2}$$

Le champ H créé au centre de la spire est égal à la somme des champs h produits par chacun des éléments composant la spire; il vaut donc :

$$H = \sum h; \quad H = k \frac{I}{d^2} \sum l; \quad H = k \frac{I}{d^2} \cdot 2\pi d; \quad H = k \frac{2\pi I}{d}$$

L'intensité du champ magnétique au centre du courant circulaire est donc :

$$H = k \frac{2\pi I}{d}$$

En appliquant cette relation au cas d'une bobine plate comportant n spires circulaires de rayon d , on trouve que le champ magnétique au centre de la bobine est :

$$H = k \frac{2\pi n I}{d}$$

***239. UNITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE D'INTENSITÉ DE COURANT.** — Nous savons qu'un élément de longueur l d'un

circuit circulaire produit en son centre un champ h qui vaut : $h = k \frac{I l}{d^2}$.

Ecrivons cette relation sous la forme : $I = \frac{h d^2}{k l}$ et faisons-y : $k = 1$,

$h = 1$ œrsted, $d = 1$ centimètre et $l = 1$ centimètre. Nous pouvons définir l'**unité électromagnétique (u e m) d'intensité de courant** : l'unité électromagnétique d'intensité de courant est l'intensité d'un courant qui, parcourant un conducteur de 1 centimètre de longueur recourbé en arc de cercle de 1 centimètre de rayon, produit au centre de l'arc un champ de 1 œrsted.

Des mesures précises ont établi que l'**ampère** vaut le dixième de l'unité électromagnétique.

$$1 \text{ ampère} = \frac{1}{10} \text{ u e m d'intensité.}$$

Si on exprime l'intensité du courant en ampères, la valeur à attribuer au coefficient k qui intervient dans les formules d'Electro-magnétisme est $\frac{1}{10}$.

solenénoïde = bobine cylindrique formée d'un fil conducteur enroulé autour régulièrement en hélice.

1) Forme des lignes de force:

spectre magnétique obtenu en suspendant de l'aimaille de fer un carton passant par l'axe du solénoïde.
 à l'intérieur de la bobine: lignes de force parallèles et uniformément réparties.

2) Sens des lignes de force

solenénoïde = succession de courants émis.
 Lignes parallèles, de même sens.

régle du tire-bouchon de Maxwell.

si le tire-bouchon tourne dans le sens du courant, il avance dans le sens des lignes de force.

Les lignes sortent par N rentrent, au sud et qui nous montre qu'un solénoïde est équivalent à un barreau aimanté.

***240. UNITÉS ÉLECTROSTATIQUES ET UNITÉS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.** — Puisque

d'une part,

1 ampère = 10^{-1} unité électromagnétique d'intensité;

et d'autre part :

1 ampère = 3.10^9 unités électrostatiques d'intensité;

il en résulte que :

$1 \text{ u e m d'intensité} = 3.10^{10} \text{ u e s d'intensité.}$
--

Les unités électromagnétiques de charge électrique, de potentiel, de résistance, de capacité se déduisent de l'unité électromagnétique d'intensité. Les valeurs des unités pratiques en unités électromagnétiques et en unités électrostatiques sont réunies dans le tableau général des unités.

Maxwell en recherchant le rapport qui existe entre les unités électromagnétiques et les unités électrostatiques remarqua que ce rapport est égal à 3.10^{10} fois l'unité de vitesse c'est-à-dire égal à la vitesse de la lumière (n° 402). Il en conclut que la lumière est due à une perturbation électromagnétique.

241. CHAMP MAGNÉTIQUE D'UN SOLÉNOÏDE. — Nous appelons solénoïde une bobine cylindrique formée d'un fil conducteur enroulé régulièrement en hélice.

1. **Forme des lignes de force.** — La forme des lignes de force du champ magnétique produit par un solénoïde lorsqu'un courant passe dans le fil conducteur est donnée par le spectre magnétique obtenu en saupoudrant de limaille de fer un carton passant par l'axe du solénoïde (fig. 309). Nous remar-

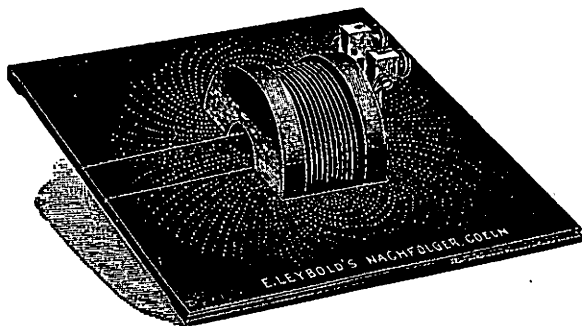


Fig. 309.

quons qu'à l'intérieur de la bobine, les lignes de force sont parallèles et uniformément réparties.

2. **Sens des lignes de force.** — Le solénoïde étant une succession de courants circulaires parallèles, de même sens, centrés sur le même axe, le sens des lignes de force à l'intérieur de la bobine

est donc obtenu par la règle du tire-bouchon de Maxwell (fig 310).

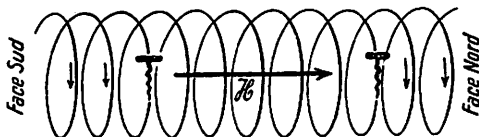


Fig. 310.

Les lignes de force sortent par une des extrémités du solénoïde (face Nord), s'épanouissent dans l'espace et rentrent par l'autre extrémité (face Sud). Le spectre magnétique extérieur à la bobine est identique au spectre magnétique d'un barreau aimanté dont le pôle Nord se trouverait à la face Nord du solénoïde et le pôle Sud à la face Sud (n° 230). Un solénoïde est donc assimilable à un barreau aimanté.

3. **Intensité du champ à l'intérieur du solénoïde.** — Le champ à l'intérieur d'un solénoïde est sensiblement uniforme puisque les lignes de force y sont parallèles. On démontre que l'intensité du champ est donnée par la relation :

$$H = \frac{4\pi}{10} nI \quad \text{ou} \quad \boxed{H = 1,25 nI}$$

n désignant le nombre de spires par centimètre de longueur du solénoïde et I représentant l'intensité du courant exprimée en ampères.

Le produit nI est souvent désigné sous le nom d'ampère-tour.

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Un solénoïde de 30 cm de longueur et de 8 cm de diamètre comporte 150 spires. Il est parcouru par un courant de 3 ampères. Calculer : 1°) l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde; 2°) le flux magnétique traversant le solénoïde; 3°) l'action exercée à l'intérieur du solénoïde sur un barreau aimanté dont les pôles ont 60 unités C. G. S. de magnétisme.

SOLUTION. — 1°) Intensité du champ magnétique :

$$H = 1,25 nI; H = 1,25 \cdot \frac{150}{30} \cdot 3 = 18,75 \text{ Oe.}$$

$$2^\circ) \text{ Flux magnétique : } \mathcal{F} = HS; \mathcal{F} = 18,75 \cdot \frac{3,14 \cdot 8^2}{4} = 942 \text{ Mx.}$$

3°) Chaque pôle du barreau aimanté est soumis à une force dont l'intensité est :

$$F = mH; F = 60 \cdot 18,75 = 1125 \text{ dyn.}$$

§ 2. ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT.

Puisqu'un courant exerce une action sur un aimant, un aimant doit, en vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, exercer une action sur un courant.

242. ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT RECTILIGNE.

1. **Direction de la force électromagnétique.** — **Expérience.** — Un fil métallique léger est suspendu horizontalement par des fils conducteurs (fig. 311). Un aimant en fer à cheval est disposé de façon à placer le fil horizontal dans un champ magnétique vertical. Lançons le courant dans le fil. Le fil se déplace parallèlement à lui-même, perpendiculairement à la direction du champ magnétique; il ne subit aucune translation ni dans la direction du champ magnétique ni dans la direction du courant.

Conclusion. — Un courant rectiligne, placé dans un champ magnétique, est soumis à une force, dite **force électromagnétique**, dont la direction est normale à la fois à la direction du courant et à la direction du champ magnétique.

2. **Sens de la force électromagnétique.** — **Expérience.** — Dans l'expérience précédente, la barre se déplace en sens inverse si on inverse le courant ou si on inverse le champ magnétique.

Fleming a énoncé une règle qui permet de prévoir le sens de la force électromagnétique, connaissant le sens du courant et le sens du champ magnétique.

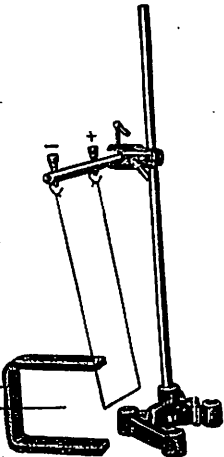
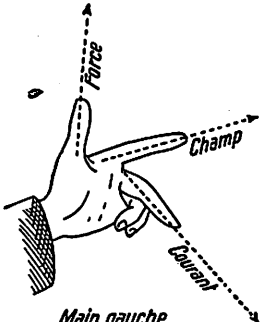


Fig. 311.



Main gauche
Fig. 312.

Règle de la main gauche de Fleming. — Si l'index de la main gauche est dirigé dans le sens du champ magnétique et le médium dans le sens du courant, le pouce, disposé perpendiculairement au plan formé par l'index et le médium, indique le sens de la force électromagnétique (fig. 312).

*index = H
médium = I
pouce = F*

voir cahier

*3. **Intensité de la force électromagnétique** — Un conducteur élémentaire *ab* de longueur *l* traversé par un courant d'intensité *I* (exprimée en ampères) exerce sur une masse magnétique + *m* disposée en un point *P* à une distance *d* du conducteur

une force *F* telle que (n° 237) : $F = mI$; $F = \frac{mI}{10d^2}$ (fig. 313). En

vertu du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, la masse magnétique exerce sur le conducteur une force égale et opposée. La force électromagnétique vaut donc :

$$F = \frac{mI}{10d^2}$$

Or, l'intensité du champ magnétique produit au point O par la masse magnétique m est : m/d^2 . Donc :

$$F = \frac{1}{10} H I l$$

H I l rilly

Cette formule est générale quelle que soit l'origine du champ magnétique. La force électromagnétique est donc proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, à l'intensité du courant et à la longueur de l'élément de courant.

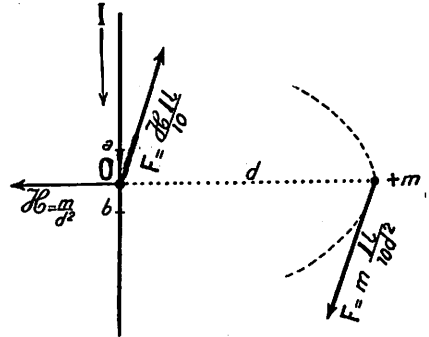


Fig. 313.

Si le champ magnétique n'est pas perpendiculaire au courant, c'est uniquement la composante du champ normale au courant qui intervient dans l'expression de la force.

243. ACTION D'UN AIMANT SUR UN COURANT CIRCULAIRE. — Une spire parcourue par un courant constitue un feuillet magnétique : elle présente une face Nord et une face Sud (n° 238). Par conséquent, si on présente le pôle Nord d'un aimant à une spire mobile parcourue par un courant, la spire s'oriente de façon à présenter sa face Sud au pôle Nord de l'aimant. Dans sa position d'équilibre, le flux que reçoit la spire par sa face Sud est maximum.

Un solénoïde parcouru par un courant est analogue à un barreau aimanté (n°241). Un solénoïde mobile est donc sensible à l'action d'un aimant; il s'oriente également dans le champ magnétique terrestre, la face Nord dirigée vers le Nord.

244. ROUE DE BARLOW. — Une roue métallique mobile autour d'un axe horizontal est placée dans l'entrefer d'un aimant en forme de fer à cheval (fig. 314). Cette roue est sans cesse très légèrement en contact avec le mercure contenu dans une cuve. Lorsqu'un courant électrique circule du mercure vers l'axe métallique de rotation, la roue tourne sous l'action de la force électromagnétique.

Le sens de rotation de la roue de Barlow peut être obtenu par la règle de la main gauche de Fleming. La roue de Barlow constitue un moteur électrique.

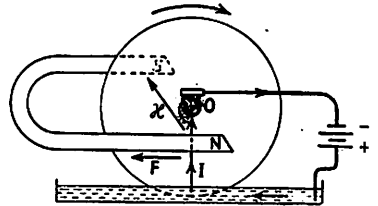
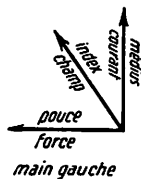


Fig. 314.

✓ **EXEMPLES NUMÉRIQUES.** — 1. Calculer la force électromagnétique exercée sur un conducteur rectiligne de 10 cm de longueur parcouru par un courant de 20 A dans un champ magnétique uniforme de 1 200 Oe dont les lignes de force forment un angle de 30° avec le conducteur.

SOLUTION. — La composante du champ normale au courant vaut :

$$H = H' \cos 60^\circ; H = 1\,200 \cdot \frac{1}{2} = 600 \text{ Oe.}$$

La force électromagnétique qui agit sur le conducteur rectiligne est donc

$$F = \frac{1}{10} H i l; F = \frac{1}{10} \cdot 600 \cdot 20 \cdot 10 = 12\,000 \text{ dyn.}$$

✓ 2. Calculer la puissance d'une roue de Barlow de rayon 20 cm tournant à raison de 30 tours par seconde dans un champ magnétique uniforme de 1 200 Oe. Le courant qui parcourt le circuit est de 10 A.

SOLUTION. — La force électromagnétique agissant sur la roue est :

$$F = \frac{1}{10} H i l; F = \frac{1}{10} \cdot 1\,200 \cdot 10 \cdot 20 = 24\,000 \text{ dyn.}$$

Le travail effectué pour un tour par cette force appliquée au milieu du rayon de la roue est :

$$T = F \cdot \pi r; T = 24\,000 \cdot 3,14 \cdot 20 = 1\,507\,200 \text{ ergs.}$$

Le travail effectué pour 30 tours vaut :

$$T = 1\,507\,200 \cdot 30 = 45\,216\,000 \text{ ergs ou } 4,52 \text{ J.}$$

La puissance de la roue de Barlow est donc de 4,52 W.

§ 3. ACTION D'UN COURANT SUR UN COURANT.

Puisqu'un champ magnétique exerce une action sur un courant et qu'un courant crée un champ magnétique, il en résulte qu'un courant doit exercer une action sur un courant.

245. COURANTS RECTILIGNES PARALLÈLES.

Raisonnement. — a) **Les courants ont même sens.** — Deux conducteurs parallèles I et II, contenus dans le même plan, sont parcourus par des courants de même sens. Le courant I crée au point C un champ magnétique H normal au plan des courants et dirigé d'avant en arrière (règle de Maxwell) (fig. 315). La force électromagnétique F subie par le courant II se trouve dans le plan des courants et est dirigée vers le courant I (règle de la main gauche de Fleming). Le même raisonnement montre que l'action du courant II sur le courant I est une force située dans le plan des courants et dirigée vers le courant II. Les deux courants parallèles et de même sens s'attirent.

b) **Les courants sont de sens contraires.** — Un raisonnement analogue à celui qui précède nous conduit à la conclusion que deux courants parallèles et de sens contraires se repoussent (fig. 316).

Vérification expérimentale. — Faisons passer un courant dont nous connaissons le sens dans un cadre mobile $a b c d$ et approchons parallèlement au côté bc du cadre le côté fg d'un cadre fixe parcouru par un courant (fig. 317). Si les courants qui parcourent les fils bc et fg ont même sens, le cadre mobile est attiré; s'ils sont de sens contraires, le cadre mobile est repoussé.

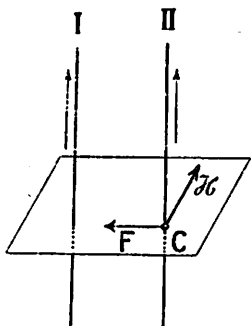


Fig. 315.

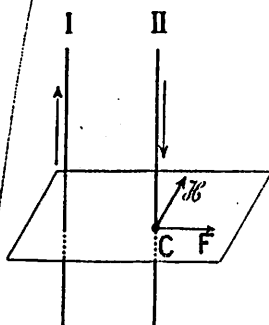


Fig. 316.

246. COURANTS ANGULAIRES.

Raisonnement. — a) Les courants se dirigent simultanément vers le sommet de l'angle ou s'en éloignent simultanément. Un raisonnement analogue à celui que nous avons développé à propos des courants parallèles nous conduit à la conclusion que ces courants s'attirent (fig. 318).

b) L'un des courants se dirige vers le sommet de l'angle, l'autre s'en éloigne.

Les deux courants se repoussent (fig. 319).

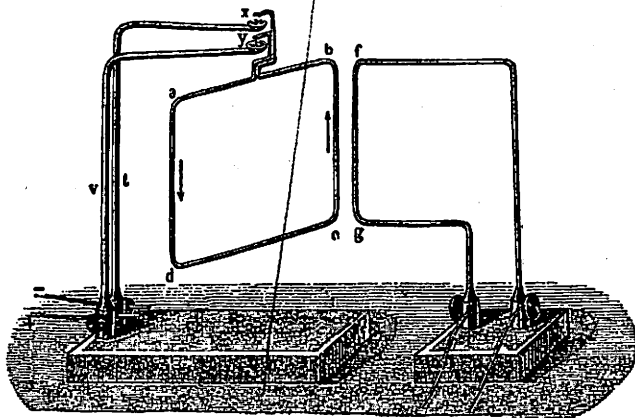


Fig. 317.

Vérification expérimentale. — L'action des courants angulaires se

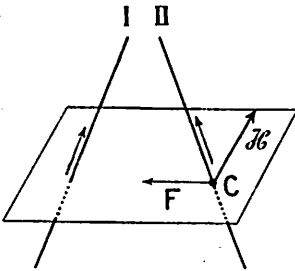


Fig. 318.

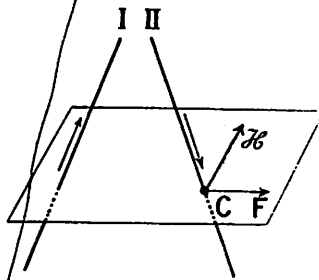


Fig. 319.

vérifie expérimentalement par un dispositif semblable à celui utilisé pour vérifier l'action réciproque des courants rectilignes.

247. COURANTS CIRCULAIRES.

Raisonnement. — Des spires parcourues par des courants étant assimilables à des aimants exercent des actions réciproques répondant aux lois d'attraction et de répulsion des aimants. Il en est de même des solénoïdes.

Vérification expérimentale. — Nous vérifions expérimentalement l'action des courants circulaires en présentant l'extrémité d'un solénoïde fixe parcouru par un courant à un solénoïde mobile parcouru par un courant.

§ 4. AIMANTATION PAR LES COURANTS.

1. LOIS.

κ 248. PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE.

Expérience. — Plaçons un barreau de fer doux dans un champ magnétique uniforme H . Le spectre nous montre que les lignes de force, à cause de la présence du fer doux, s'infléchissent et se concentrent dans le métal; elles trouvent en quelque sorte un passage plus facile dans le fer que dans l'air (fig. 320).

Conclusion. — Le fer présente une perméabilité magnétique plus grande que l'air. Le champ inducteur H produit, à l'intérieur du barreau de fer doux, un champ magnétique B très intense que nous appellerons induction magnétique.

L'induction magnétique s'exprime en gauss (Gs), du nom de Gauss (physicien allemand : 1777-1855).

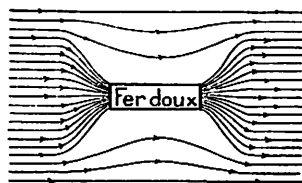


Fig. 320.

249. PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE. — On appelle perméabilité magnétique μ d'une substance le rapport de l'induction magnétique \mathcal{B} qui règne dans cette substance au champ inducteur H qui lui a donné naissance.

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{H}$$

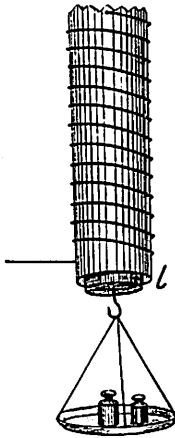


Fig. 321.

La perméabilité magnétique dépend, entre autres, de la nature de la substance et de l'intensité du champ inducteur. Il est très voisin de l'unité pour les substances non magnétiques, il atteint une valeur très élevée pour les substances magnétiques (fer, nickel, cobalt, chrome).

250. ÉTUDE DE L'INDUCTION MAGNÉTIQUE EN FONCTION DU CHAMP INDUCTEUR.

1. Dispositif expérimental. — On utilise un solénoïde dont on connaît le nombre de tours; la mesure de l'intensité I du courant qui parcourt le solénoïde permet de connaître l'intensité du champ H à l'intérieur du solénoïde (n° 241) :

$$H = 1,25 \pi I.$$

On introduit dans le solénoïde un barreau de fer de même diamètre (fig. 321). Un petit disque de fer l muni d'un crochet et d'un plateau est appliqué contre l'extrémité plane du barreau. Au moyen de poids, on détermine la force nécessaire pour arracher au barreau le disque de fer. Le calcul montre que cette force, exprimée en dynes, est donnée par la relation

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$$

S désignant la surface du disque exprimée en centimètres carrés. La connaissance de la force nécessaire à l'arrachement permet de calculer l'induction magnétique \mathcal{B} du barreau.

$$\mathcal{B} = \sqrt{\frac{8\pi F}{S}}$$

2. Résultats. — a) **Fer doux** (1). — En augmentant progressivement le champ inducteur H de 0 à 50 oersteds (par une variation correspondante de l'intensité du courant parcourant le solénoïde), l'induction magnétique \mathcal{B} du fer doux augmente d'abord très rapidement pour atteindre 12 000 gauss, ensuite plus lentement (fig. 322). Pour des valeurs du champ inducteur voisines de 50 oersteds, l'accroissement $\Delta \mathcal{B}$ de l'induction magnétique devient sensiblement égal à l'accroissement ΔH du champ inducteur : le fer doux est alors saturé, il a atteint son aimantation maximum.

(1) Le fer doux contient au maximum 0,1 % de carbone ; la fonte : de 2 à 6 % ; l'acier : de 0,2 à 0,6 %. L'acier chauffé et brusquement refroidi est dit acier trempé.

Des valeurs correspondantes de l'induction magnétique B et du champ inducteur H , on déduit la valeur de la perméabilité magnétique du fer doux. On remarque que la perméabilité magnétique n'est pas une constante. Sa variation en fonction du champ inducteur est représentée par le graphique de la figure 323.

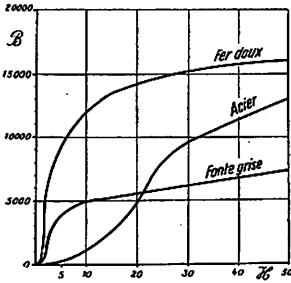


Fig. 322.

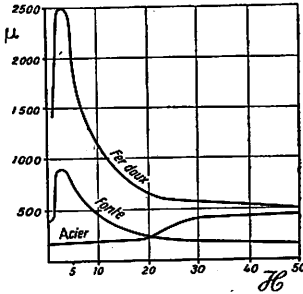


Fig. 323.

b) **Fonte grise.** — L'induction magnétique croît moins vite que pour le fer doux et la saturation n'est atteinte que pour des champs très intenses (fig. 322 et 323).

c) **Acier trempé.** — L'induction magnétique croît plus lentement que pour le fer doux et tend vers la même valeur de saturation (fig. 322 et 323).

251. CYCLE D'AIMANTATION. — HYSTÉRÉSIS.

Expérience. — En employant le dispositif expérimental décrit au numéro précédent, soumettons le noyau magnétique (fer doux ou acier) du solénoïde à un champ inducteur H variant entre deux intensités égales mais de signes contraires ; déterminons les variations correspondantes de l'induction magnétique B du noyau.

1°) **Fer doux.** — a) Le champ inducteur croît de 0 à H oersteds : l'induction magnétique augmente de 0 (si le fer doux n'est pas préalablement aimanté) à B gauss (courbe OA, fig. 324)

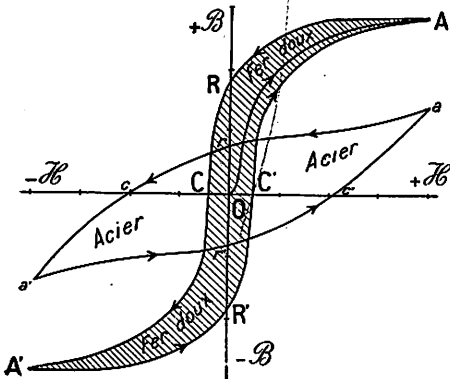


Fig. 324.

b) Le champ inducteur décroît de H à 0 oersteds : l'induction magnétique diminue de B à B_R gauss tout en restant constamment supérieure à l'induction magnétique obtenue lors de l'aimantation (courbe AR, fig. 324). La valeur B_R , représentée par OR, mesure le **magnétisme rémanent** du fer doux.

c) Le champ inducteur passe de 0 à $-H$ oersteds (inversion du courant dans le solénoïde) l'induction magné-

tique passe de B_R à $-B$ gauss (courbe RCA', fig. 324). L'induction magnétique s'annule pour la valeur $-H_c$, représentée par OC, du champ inducteur; cette valeur du champ, qui annule l'aimantation dans le fer doux, est appelée **champ coercitif** du fer doux.

d) Le champ inducteur varie régulièrement de $-H$ à H oersteds: le point figuratif de l'induction magnétique décrit la courbe A'R'C'A qui est symétrique de la courbe ARCA' par rapport au point O (fig. 324).

e) Le champ inducteur varie alternativement de H à $-H$ oersteds et ensuite de $-H$ à H oersteds, le point figuratif de l'induction magnétique décrira le cycle ARCA'R'C' (fig. 324.)

2°) **Acier.** — Le cycle *arca'r'c'* représente le cycle décrit par le point figuratif de l'induction magnétique de l'acier lorsque le champ varie alternativement de H à $-H$ oersteds et de $-H$ à H oersteds (fig. 324).

Conclusion. — L'induction magnétique B est constamment en retard sur le champ inducteur H : ce retard s'appelle **hystérésis**. Les cycles ARCA'R'C' et *arca'r'c'* sont appelés **cycles d'hystérésis** ou encore **cycles d'aimantation**.

Remarques. — 1. Le coefficient de perméabilité μ d'une substance magnétique ne dépend pas seulement de la nature de la substance et du champ inducteur mais encore de la valeur antérieure de l'induction.

2. Le magnétisme rémanent de l'acier, quoique moins intense que celui du fer doux, nécessite pour s'annuler un champ coercitif plus intense.

252. PERTE D'ÉNERGIE PAR HYSTÉRÉSIS. — L'aimantation exige de l'énergie qui est fournie par le courant et qui se transforme en chaleur dans la substance soumise à l'aimantation. Par conséquent, une substance magnétique soumise à des aimantations successives (alternateurs, transformateurs) s'échauffera notablement. L'énergie dissipée est proportionnelle à la surface du cycle d'hystérésis. Le fer doux est, à ce point de vue, plus avantageux que l'acier.

2. APPLICATIONS.

253. PRODUCTION D'AIMANTS PERMANENTS. — Les aimants permanents sont en acier (1) et non en fer doux, parce que le magnétisme rémanent de l'acier est beaucoup plus stable que celui du fer doux. Pour aimanter un barreau d'acier, on enroule un fil conducteur en spires régulières autour du barreau et on lance dans ce solénoïde un courant assez intense.

Pour conserver aux aimants permanents leur efficacité, on relie les pôles par des pièces en fer doux (armatures) qui canalisent les lignes de force.

(1) On utilise, à l'heure actuelle, un acier renfermant: de 0,5 à 0,7 % carbone, de 0,3 à 0,5 % manganèse, de 0,3 à 3 % chrome et 6 % molybdène. Le magnétisme rémanent de cet acier au molybdène est plus stable que le magnétisme rémanent des aciers ordinaires.

254. ÉLECTRO-AIMANT. — L'électro-aimant est un aimant temporaire. Il est constitué d'un noyau de fer doux sur lequel est enroulé un fil conducteur isolé. Lorsqu'un courant, même très faible, est lancé dans le solénoïde, le noyau s'aimante ; lorsque le courant est interrompu, le noyau ne conserve que de très faibles propriétés magnétiques.

Les électro-aimants affectent la forme de barreau, d'anneau, de fer à cheval. Dans l'électro-aimant en fer à cheval, l'enroulement du fil change de sens lorsqu'on passe d'une branche à l'autre, condition nécessaire pour obtenir des pôles de noms contraires aux extrémités libres du noyau (fig. 325).

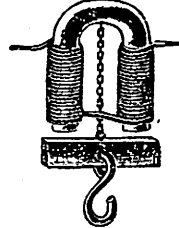


Fig. 325.

L'électro-aimant, plus puissant et plus maniable que l'aimant permanent, est utilisé : 1^o) pour l'obtention de champs magnétiques très intenses (20 000 à 50 000 gauss); 2^o) pour la manu-

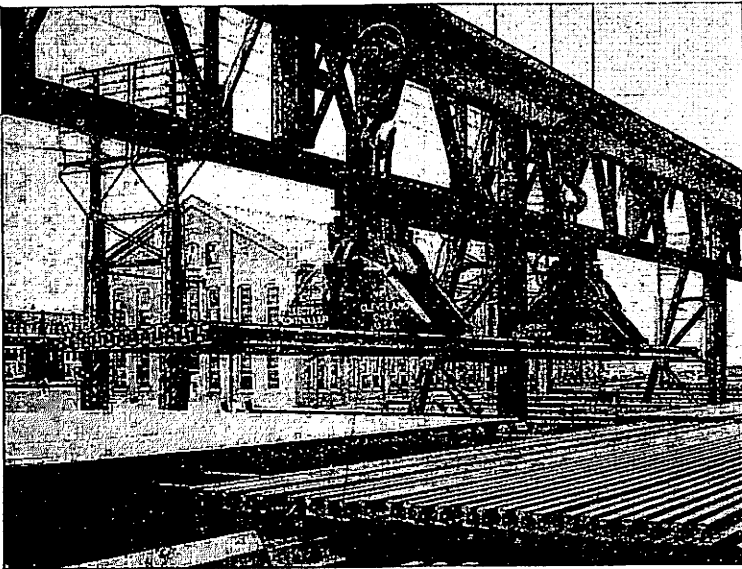


Photo J. Boyer.

Fig. 326.

Deux puissants électro-aimants servant à la manutention des rails de chemin de fer.

tention des rails, des lingots de fonte, etc... (la force portante des électro-aimants est de l'ordre de 10 kg' par centimètre carré de surface polaire); 3^o) pour la commande à distance de certains appareils (une pièce en fer doux est attirée par l'électro-aimant).

255. SONNERIE ÉLECTRIQUE. — La sonnerie électrique comporte un électro-aimant, un trembleur en fer doux et un timbre (fig. 327). Le trembleur fixé à une lame élastique s'appuie sur une vis.

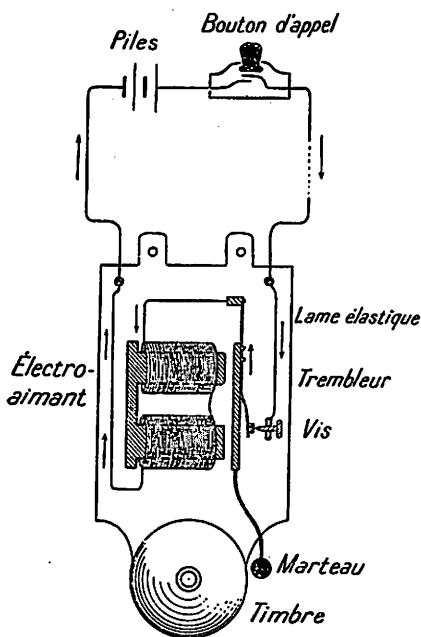


Fig. 327

à nouveau et le phénomène décrit se reproduit.

L'une des bornes d'un générateur est en relation avec l'une des extrémités du fil conducteur de l'électro-aimant; l'autre borne du générateur est reliée par l'intermédiaire du bouton d'appel, de la vis et du trembleur à l'autre extrémité du fil de l'électro-aimant. Lorsqu'on appuie sur le bouton d'appel, le courant passe dans l'électro-aimant : ce dernier attire le trembleur dont le marteau frappe le timbre. Mais, par suite du déplacement du trembleur, le contact entre la vis et le trembleur est rompu, le courant est interrompu et l'aimantation de l'électro-aimant cesse : le trembleur, sollicité par l'élasticité de la lame, est ramené en contact avec la vis. Le courant passe

256. TÉLÉGRAPHIE. — La transmission de signaux à longue distance se fait en principe de la façon suivante (fig. 328). L'appareil

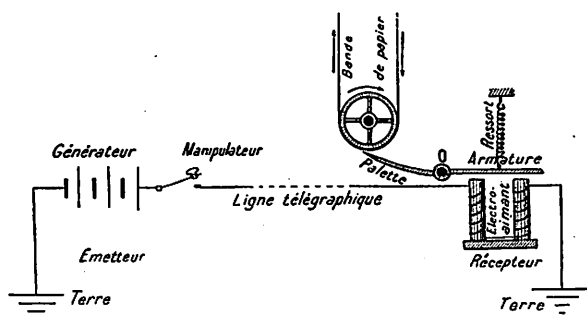


Fig. 328.

émetteur comporte un générateur dont la borne positive est reliée à la ligne télégraphique par l'intermédiaire d'un manipulateur et dont la

borne négative est reliée à la terre. L'appareil récepteur comporte un électro-aimant dont l'enroulement a une de ses extrémités reliée à la ligne télégraphique et l'autre à la terre. L'armature en fer doux de l'électro-aimant, suspendue à un ressort, est munie d'une palette dont le stylet, enduit d'encre, peut s'appuyer sur une bande de papier s'enroulant sur un tambour animé d'un mouvement de rotation. Lorsqu'on appuie sur le manipulateur, le courant passe dans l'électro-aimant; l'armature, attirée par l'électro-aimant, tourne autour de son axe O; le stylet s'applique sur la bande de papier et y imprime un trait. La longueur du trait imprimé est fonction du temps pendant lequel on a appuyé sur le manipulateur. On a conventionnellement représenté les lettres et les chiffres par des combinaisons variées de points et de traits (alphabet Morse).

3. THÉORIE DU MAGNÉTISME.

257. CONSTITUTION DES AIMANTS. — Nous avons montré qu'un solénoïde se comporte en tout point comme un barreau aimanté (n° 241). Ne pouvons-nous considérer qu'un aimant doit ses propriétés magnétiques à des courants électriques circulant à la surface de l'aimant? En d'autres termes, ne pouvons-nous considérer un aimant comme analogue à un solénoïde parcouru par un courant? Cette conception, formulée par Ampère qui ne pouvait cependant pas s'expliquer l'origine des courants électriques dans l'aimant, est actuellement confirmée par la théorie électronique. Dans les atomes, la circulation des électrons sur leurs orbites constitue de petits courants circulaires qui produisent un champ magnétique : les atomes sont donc de petits feuillets magnétiques (n° 238). Dans une substance magnétique non aimantée, les orbites électroniques sont disposées, au hasard, dans toutes les directions : les feuillets magnétiques annulent mutuellement leurs effets (1). Sous l'action d'un champ magnétique, les courants électroniques adoptent une orientation commune (fig. 329) : les feuillets s'orientent de façon à présenter leur face Sud aux lignes de force du champ inducteur (n° 243). Dans la masse de l'aimant, les petits courants circulaires immédiatement voisins marchent en sens inverse et se détruisent; à la périphérie de l'aimant, les parties externes des petits courants circulaires s'ajoutent et forment autour du barreau des courants circulaires analogues à ceux qui parcourent un solénoïde parcouru par un courant. Le magnétisme apparaît ainsi comme

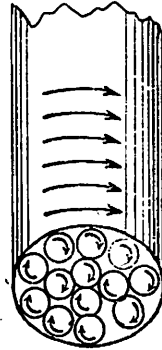


Fig. 329.

(1) Si dans une boîte prismatique nous jetons pêle-mêle de petits cubes aimantés, toute surface extérieure du prisme présentera en moyenne autant de pôles Nord que de pôles Sud : l'ensemble ne constituera pas un aimant. Au contraire, si nous empilons régulièrement les cubes, leur face Nord vers le bas, le prisme se comportera comme un aimant ayant son pôle Nord en bas, son pôle Sud en haut.

une propriété des courants électriques. Quoique présenté comme un phénomène spécial, le magnétisme s'intègre dans l'électricité.

258. INTERPRÉTATIONS. — 1^o) **Saturation magnétique.** — La saturation magnétique correspond à l'orientation de toutes les orbites électroniques.

2^o) **Magnétisme rémanent et hystérésis.** — Les frottements intérieurs et l'agitation moléculaire s'opposent à l'orientation des orbites électroniques; c'est la raison pour laquelle il faut un champ inducteur d'une certaine intensité pour que l'orientation des orbites soit complète et totale. Après disparition du champ inducteur, un certain nombre d'orbites électroniques conservent, par suite des frottements, leur orientation (phénomène à rapprocher de la déformation permanente des corps élastiques).

3^o) **Champ coercitif.** — L'orientation des orbites électroniques, après la disparition du champ inducteur, sera d'autant plus stable que les frottements intérieurs seront plus grands. *Exemple* : acier.

4^o) **Perte d'énergie par hystérésis.** — L'orientation alternative des orbites électroniques dans un sens, puis dans le sens opposé, nécessite de l'énergie qui, comme dans tout frottement, se transforme en chaleur.

5^o) **Atténuation et disparition des propriétés magnétiques.** — L'agitation thermique contrarie l'orientation des orbites électroniques; à partir d'une certaine température, toute orientation d'ensemble des orbites est impossible : une aiguille aimantée chauffée perd toute propriété magnétique.

§ 5. INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

L'induction électromagnétique, dont la découverte revient à Faraday, étudie les conditions dans lesquelles un champ magnétique produit un courant électrique.

259. LOIS ^{qualitatives} DE L'INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE.

Expériences. — Réunissons à un galvanomètre un solénoïde constitué d'un fil long et mince enroulé en spires nombreuses et serrées (fig. 330). Introduisons vivement dans ce solénoïde le pôle Nord d'un barreau aimanté, l'aiguille du galvanomètre dévie : un courant, que nous appellerons **courant induit**, se développe dans les spires du solénoïde.

Lorsque l'aimant est arrêté, l'aiguille du galvanomètre revient au zéro : le courant induit n'est que temporaire, il dure ce que dure le mouvement de l'aimant.

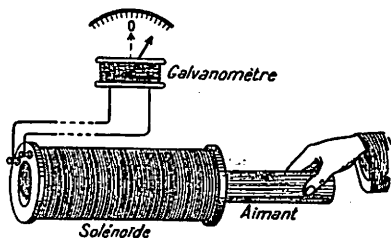


Fig. 330.

Retirons vivement l'aimant du solénoïde, l'aiguille du galvanomètre dévie en sens inverse : le courant induit dans les spires du solénoïde est donc de sens inverse au sens du courant induit lors de l'introduction de l'aimant.

Lois de l'induction électromagnétique. — 1^o) Cause du courant induit. — Le flux magnétique à travers les spires de la bobine augmente lorsque l'aimant s'approche, reste fixe lorsque l'aimant est arrêté, diminue lorsque l'aimant s'éloigne. Les expériences précédentes montrent qu'il existe entre variation du flux magnétique et production de courant induit une relation de cause à effet.

2^o) Durée du courant induit. — Le courant induit a même durée que la variation du flux magnétique qui lui donne naissance.

3^o) Sens du courant induit. Loi de Lenz (physicien russe : 1804-1885). — Le courant induit crée à l'intérieur de la bobine un champ magnétique dont le sens est donné par la règle du tire-bouchon de Maxwell (n^o 237) : le tire-bouchon tournant dans le sens des lignes de force du champ magnétique induit progresse le long du conducteur dans le sens du courant induit.

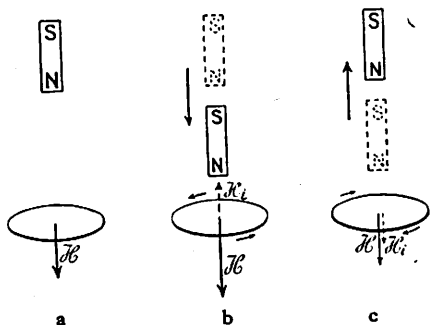


Fig. 331.

a) Par suite de l'introduction de l'aimant dans la bobine, le flux magnétique à travers celle-ci augmente; le courant induit est de sens tel qu'il crée un flux de sens inverse au sens du flux qui augmente (fig. 331 b).

b) Par suite du retrait de l'aimant de la bobine, le flux magnétique à travers celle-ci diminue; le courant induit est de sens tel qu'il crée un flux de même sens que le flux qui diminue (fig. 331 c).

Le courant induit produit à travers son propre circuit un flux magnétique qui tend toujours à compenser la variation de flux qui lui donne naissance (Loi de Lenz).

Induction par courant

260. PRODUCTION DE COURANTS INDUITS. — Les lois de l'induction électromagnétique permettent de prévoir que, chaque fois qu'il y a variation de flux magnétique à travers un circuit, il s'y produit un courant induit.

1^o) Un courant qui s'établit, qui augmente d'intensité ou qui s'approche produit dans un circuit voisin un courant induit tempo-

raire de sens inverse au courant inducteur : le courant induit est dit inverse. Un courant qui finit, qui diminue d'intensité ou qui s'éloigne produit dans un circuit voisin un courant induit temporaire de même sens que le courant inducteur : le courant induit est dit direct.

Vérification expérimentale. — Dans une bobine fixe B introduisons une bobine C, à fil gros et court, parcourue par un courant dont nous connaissons le sens (fig. 332). Nous constatons que la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire inverse. Retirons la bobine C de la bobine B. Nous constatons que la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire direct.

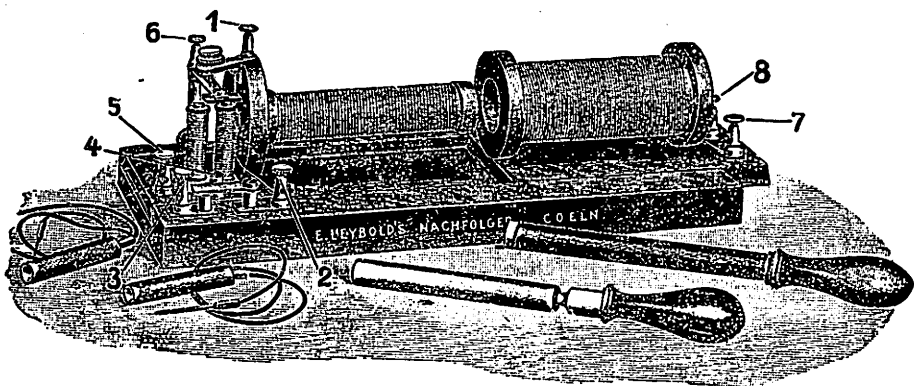


Fig. 332.

Fixons la bobine C dans la bobine B; lançons le courant dans la bobine C, augmentons ensuite l'intensité du courant : dans les deux cas, la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire inverse. Diminuons l'intensité du courant dans la bobine C, interrompons le courant; dans les deux cas, la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire direct.

2^o) Une substance magnétique qui renforce ou diminue le flux produit dans un circuit voisin un courant induit.

Vérification expérimentale. — La bobine C fixée dans la bobine B est parcourue par un courant d'intensité constante : la bobine B n'est parcourue par aucun courant. Introduisons dans la bobine C un barreau de fer doux : la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire inverse. Enlevons le barreau de fer doux : la bobine B est parcourue par un courant induit temporaire direct.

261. FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE.

Expérience. — Déplaçons de droite à gauche un conducteur AB sur deux rails horizontaux dans un champ magnétique vertical dirigé de bas en haut : l'aiguille du galvanomètre dévie (fig. 333). La déviation de l'aiguille

du galvanomètre est inversée si le déplacement se fait de gauche à droite (fig. 334) ou si le champ magnétique vertical est dirigé de haut en bas.

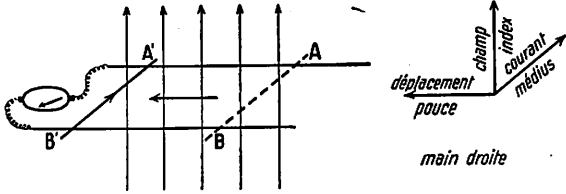


Fig. 333.

Conclusion. — Tout conducteur coupant les lignes de force

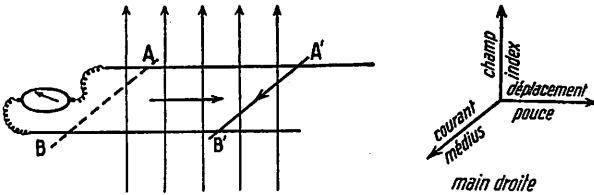


Fig. 334.

d'un champ magnétique est le siège d'une force électromotrice induite dont le sens, conforme à la loi de Lenz, se trouve aisément par la **règle de la main droite de Fleming** : si l'index de la main droite est dirigé dans le sens du champ inducteur et le pouce dans le sens du mouvement du conducteur, le médium disposé perpendiculairement au plan formé par l'index et le pouce indique le sens du courant induit (fig. 335).

La règle de la main droite de Fleming est d'application courante pour la détermination du sens des courants induits dans un conducteur en mouvement dans un champ magnétique.

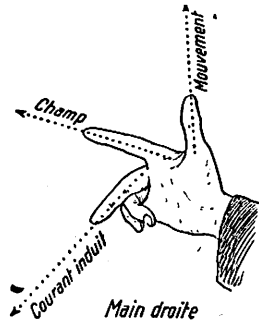


Fig. 335.

***262. CALCUL DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE INDUITE.** — La production d'un courant induit dans un circuit lors de la variation du flux qui le traverse prouve qu'il s'y développe une force électromotrice induite. Pour déterminer la valeur de cette force électromotrice, considérons un circuit fermé ABCD qui comporte l'élément AB libre de se mouvoir sans frottement sur les fils conducteurs L et L' de résistance négligeable (fig. 336). Ce circuit est traversé perpendiculairement par les lignes de force d'un champ magnétique uniforme H , dirigé de bas en haut. Déplaçons d'un mouvement uniforme l'élément mobile AB de manière à le

faire passer de la position AB à la position A'B' distante de d centimètres. Le circuit, pendant ce déplacement, est soumis à une augmentation régulière du flux magnétique : il est donc parcouru par un courant induit dont la durée Δt est égale à la durée du

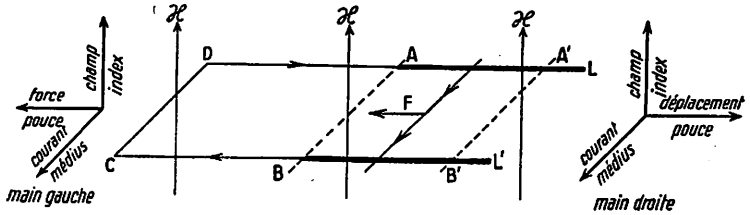


Fig. 336.

déplacement de l'élément mobile AB. Si I désigne l'intensité du courant induit et R la résistance totale du circuit, la force électromotrice induite E , exprimée en volts, que nécessite la production de ce courant est

$$E = IR.$$

L'énergie de ce courant, dissipée en chaleur par effet Joule, est donnée, en joules, par :

$$T = I^2 R \Delta t ; \quad T = E I \Delta t.$$

D'autre part, pendant son déplacement l'élément mobile AB, parcouru par le courant d'intensité I de sens indiqué par la flèche (règle du tire-bouchon ou règle des trois doigts de la main droite) et placé dans le champ magnétique H , est soumis à une force électromagnétique dirigée en sens inverse de son déplacement (règle des trois doigts de la main gauche). Cette force, exprimée en dynes, est donnée par la relation (n° 242)

$$F = \frac{1}{10} HIl,$$

l étant la longueur de l'élément mobile AB.

Pour produire le déplacement de l'élément mobile de AB en A'B', il faut produire un travail. Ce travail vaut exprimé en ergs

$$T = Fd ; \quad T = \frac{1}{10} HIl d,$$

exprimé en joules

$$T = 10^{-8} HIl d.$$

Remarquons que le produit $HIl d$ est le flux magnétique coupé par l'élément mobile AB c'est-à-dire l'accroissement de flux $\Delta \mathcal{F}$ à travers le circuit.

Nous avons donc :

$$T = 10^{-8} I \Delta \mathcal{F}.$$

En vertu du principe de la conservation de l'énergie, égalons l'énergie dissipée en chaleur par le courant induit à l'énergie fournie pour le produire, il vient :

$$E I \Delta t = 10^{-8} I \Delta \mathcal{F}$$

D'où nous tirons :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}$$

Le rapport $\Delta \mathcal{F} / \Delta t$ exprime la vitesse de variation de flux.

La force électromotrice induite dans un circuit est directement proportionnelle à la vitesse de variation de flux.

***263. QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ INDUITE.** — La quantité Q d'électricité induite, exprimée en coulombs, se déduit de la relation précédente :

$$Q = I \cdot \Delta t; \quad Q = \frac{E}{R} \cdot \Delta t; \quad Q = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{R}.$$

La quantité d'électricité induite est proportionnelle à la variation de flux mais elle est indépendante de la durée de cette variation.

***264. INTENSITÉ DU COURANT INDUIT.** — L'intensité I du courant induit, exprimée en ampères, est :

$$I = \frac{E}{R}; \quad I = \frac{10^{-8}}{R} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}.$$

L'intensité du courant induit dans un circuit est directement proportionnelle à la vitesse de variation de flux.

265. COURANTS DE FOUCAULT. — Une masse métallique pouvant être considérée comme formée d'une infinité de circuits fermés, toute variation de flux magnétique à travers cette masse y produira des courants induits qui s'opposent à cette variation. La masse métallique en mouvement dans un champ magnétique y subit donc un freinage. L'énergie des courants induits se dissipe en chaleur : la masse métallique s'échauffe. Mais si la masse métallique est feuilletée perpendiculairement à la direction des courants d'induction c'est-à-dire formée de feuillets isolés, ces courants dits de Foucault ne peuvent plus se produire.

Expériences. — Faisons osciller un disque de cuivre entre les pôles d'un électro-aimant (fig. 337). Les oscillations, qui s'effectuent aisément tant que l'électro-aimant n'est pas excité, cessent très rapidement lorsque nous envoyons un courant dans l'électro-aimant.

Faisons osciller entre les pôles de l'électro-aimant un disque de cuivre muni de fentes radiales et excisons l'électro-aimant : malgré l'établissement du champ magnétique, les oscillations du pendule ne s'amortissent que très lentement.

HENRY

autour d'un... 236... si on courtait un... même

X

266. SELF-INDUCTION. — Au moment où on lance le courant électrique dans une bobine, il s'établit un champ magnétique. D'après les lois de l'induction, la bobine elle-même est le siège d'un courant induit de sens inverse au sens du courant qui s'établit (n° 260). Ce courant d'induction est appelé **extra-courant de fermeture** : il affaiblit pendant quelques instants le courant principal. Réciproquement, à l'instant où l'on ouvre le circuit, le champ magnétique du solénoïde s'annule. D'après les lois de l'induction, la bobine est le siège d'un courant induit de même sens que le courant interrompu (n° 260). Ce courant d'induction, appelé **extra-courant d'ouverture**, prolonge un instant le courant interrompu. Puisque la durée d'ouverture est très petite, la force électromotrice induite de l'extra-courant d'ouverture est relativement élevée (quel-

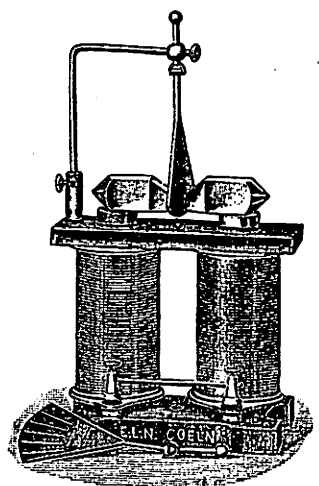


Fig. 337.

ques centaines de volts); ce fait à l'interrupteur lors de l'ouverture du circuit. La présence d'un noyau de fer doux dans le solénoïde amplifie considérablement les extra-courants d'ouverture et de fermeture. Ces phénomènes d'induction d'un courant sur lui-même portent le nom de phénomènes de self-induction.

Expérience. — Un solénoïde et une lampe sont disposés en dérivation sur un circuit de piles (fig. 338). La résistance du solénoïde est telle que la lampe n'éclaire que faiblement. Lors de l'ouverture et de la fermeture du circuit, la lampe brille un instant d'un vif éclat.

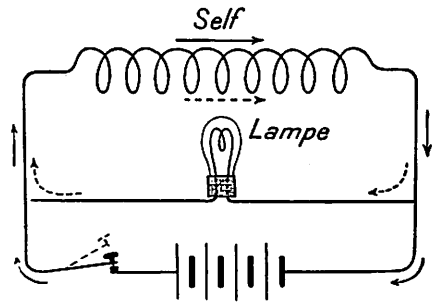


Fig. 338.

*267. COEFFICIENT DE SELF-INDUCTION. — Le flux magnétique \mathcal{F} produit par un courant dans son propre circuit est proportionnel à l'intensité I du courant puisque le champ magnétique H est proportionnel à l'intensité I du courant; la variation du flux $\Delta\mathcal{F}$ concomitante à une variation d'intensité ΔI du courant est donc proportionnelle à cette dernière :

$$\Delta\mathcal{F} = k\Delta I$$

Si cette variation se produit en un temps Δt , il se crée un courant de self-induction dont la force électromotrice vaut (n° 261) :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}; E = 10^{-8} \cdot k \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}; E = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Le coefficient de proportionnalité L est appelé coefficient de self-induction; il s'exprime en **henrys (H)**. Ce coefficient, pour un circuit déterminé, vaut un henry si une variation d'intensité de un ampère par seconde y crée une force électromotrice de self de un volt.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un cadre de 50 cm de côté portant 200 spires tourne autour d'un axe vertical dans un champ magnétique horizontal uniforme de 30 Oe. La vitesse constante de rotation du cadre étant de 20 tours à la seconde, calculer : a) la force électromotrice induite moyenne; b) l'intensité moyenne du courant induit sachant que la résistance totale du circuit est de 48 Ω .

SOLUTION. — a) Considérons une spire unique : lorsqu'elle est perpendiculaire au champ, le flux est maximum et vaut :

$$\mathcal{F} = HS; \mathcal{F} = 30 \cdot 50^2 = 75\,000 \text{ Mx.}$$

Lorsque la spire a tourné d'un quart de tour, le flux est nul (le cadre est parallèle au champ). La variation de flux $\Delta \mathcal{F}$ pour un quart de tour est donc de 75 000 Mx. La durée Δt de cette variation est de 1/80 s. La force électromotrice moyenne induire dans la spire pendant un quart de tour est donc :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}; E = 10^{-8} \cdot \frac{75\,000}{\frac{1}{80}} = 0,06 \text{ V.}$$

Le raisonnement qui précède est applicable à chaque spire. La force électromotrice moyenne totale est, les spires étant reliées en série :

$$E_{200} = 0,06 \cdot 200 = 12 \text{ V.}$$

b) L'intensité moyenne du courant induit est :

$$I = \frac{E}{R}; I = \frac{12}{48} = 0,25 \text{ A.}$$

2. Une bobine de 50 cm de longueur et de 100 cm² de section comporte 20 spires par centimètre. L'établissement d'un courant de 2 A dure 1/5 s, l'interruption 1/50 s. Calculer : a) la force électromotrice de l'extra-courant de fermeture; b) la force électromotrice de l'extra-courant d'ouverture; c) le coefficient de self-induction de la bobine; d) les valeurs des forces électromotrices des courants de self et du coefficient de self si on introduit dans la bobine un noyau en fer doux dont la perméabilité magnétique est 300.

SOLUTION. — a) Flux magnétique à travers le solénoïde avant l'établissement du courant :

$$\mathcal{F} = 0.$$

Flux magnétique à travers le solénoïde après l'établissement du courant :

$$\mathcal{F}' = H S n l; \mathcal{F}' = 1,25 n I \cdot S n l; \mathcal{F}' = 1,25 \cdot 20^2 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 50 = 5 \cdot 10^6 \text{ Mx.}$$

Force électromotrice de l'extra-courant de fermeture :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\mathcal{F}' - \mathcal{F}}{\Delta t}; E = 10^{-8} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,2} = 0,25 \text{ V.}$$

b) A l'ouverture du circuit, la même variation de flux se produit; la force électromotrice de l'extra-courant d'ouverture est :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\mathcal{F}' - \mathcal{F}}{\Delta t}; E = 10^{-8} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,02} = 2,5 \text{ V.}$$

c) Le coefficient de self de la bobine vaut :

$$L = E \cdot \frac{\Delta t}{\Delta I}; L = 0,25 \cdot \frac{0,2}{2} = 0,025 \text{ H}$$

$$\text{ou } L = E \cdot \frac{\Delta t}{\Delta I}; L = 2,5 \cdot \frac{0,02}{2} = 0,025 \text{ H}$$

d) Force électromotrice de l'extra-courant de fermeture

$$E = 0,25 \cdot 300 = 75 \text{ V.}$$

Force électromotrice de l'extra-courant d'ouverture

$$E = 2,5 \cdot 300 = 750 \text{ V.}$$

Coefficient de self-induction de la bobine :

$$L = 0,025 \cdot 300 = 7,5 \text{ H.}$$

§ 6. GÉNÉRATEURS ET MOTEURS A COURANT CONTINU.

1. GÉNÉRATEURS.

Les générateurs électriques industriels sont basés sur l'induction électromagnétique. Ils fournissent l'énergie électrique aux dépens de l'énergie mécanique dans des conditions économiques. Le premier générateur industriel est dû à Gramme (ouvrier mécanicien belge : 1826-1901) dont l'invention a permis l'essor de l'industrie électrique moderne.

268. PRINCIPE. — Entre les pôles d'un aimant constituant l'inducteur est disposé un anneau de fer doux mobile autour d'un axe central (fig. 339). Sur cet anneau, qui concentre les lignes de force

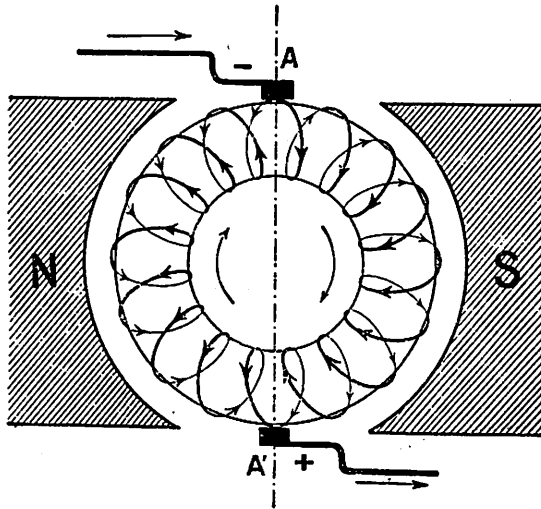


Fig. 339.

du champ magnétique de l'aimant, est enroulé régulièrement un fil de cuivre isolé formant un circuit entièrement fermé sur lui-même. L'anneau de fer doux et le fil conducteur constituent l'induit. La rotation de l'induit ne modifie pas la répartition dans l'espace des lignes de force du champ magnétique mais modifie à tout instant le flux magnétique à travers chaque spire.

Considérons une spire entraînée par l'anneau dans son mouvement de rotation (fig. 340). a) Lorsque la spire passe de la position 1 à la position 2, le flux à travers la spire diminue : il s'y produit un courant induit dont le sens, obtenu

par la règle du tire-bouchon ou de la main droite (n° 259 ou n° 261), est indiqué par la flèche. b) Lorsque la spire passe de la position 2 à la position 3, le flux à travers la spire augmente mais la face de la spire qui reçoit les lignes de force a changé : il se développe dans la spire un courant induit dont le sens, obtenu par la règle du tire-bouchon ou de la main droite, est indiqué par la flèche. Le courant induit est de même sens que le courant induit lors du passage de

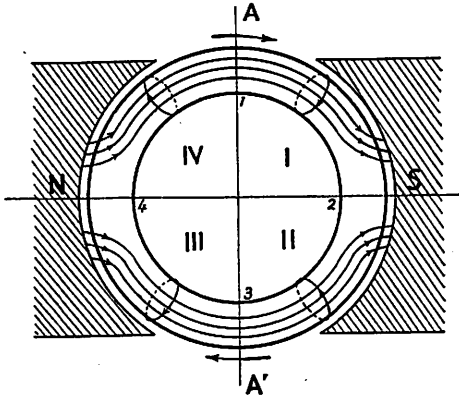


Fig. 340.

la spire dans le quart de cercle I. c) Lorsque la spire passe de la position 3 à la position 4, le flux à travers la spire diminue et la face de la spire qui reçoit les lignes de force n'a pas changé : il se développe un courant induit inverse du courant induit lors du passage de la spire dans le quart de cercle II. d) Lorsque la spire passe de la position 4 à la position 1, le flux à travers la spire augmente mais la face de la spire qui reçoit les lignes de force a changé : il se produit un courant induit de même que sens le courant induit lors du passage de la spire dans le quart de cercle III. Le courant induit dans la spire change donc de sens lors de son passage par la droite AA' perpendiculaire à la direction du champ magnétique de l'inducteur : cette droite est dite ligne neutre.

Considérons à présent l'ensemble de l'induit en rotation (fig. 339). Les forces électromotrices induites dans les spires situées à droite de la ligne neutre, étant de même sens, s'additionnent; il en est de même des forces électromotrices induites dans les spires situées à gauche de la ligne neutre. Tout étant symétrique par rapport à la ligne neutre, la force électromotrice totale développée dans les spires situées à gauche de la ligne AA' est égale et opposée à la force électromotrice totale développée dans les spires situées à droite de la ligne AA'. Si le circuit est uniquement formé de l'induit, les deux forces électromotrices opposées s'annulent : aucun courant ne circule dans l'induit. Mais si par un dispositif approprié, appelé **collecteur**, nous relions les points A et A' aux extrémités d'un conducteur extérieur, nous permettons aux deux courants opposés produits dans l'induit de s'écouler dans le conducteur extérieur où ils s'additionnent (fig. 339).

269. INDUCTEUR. — Dans la **magnéto**, l'inducteur est constitué d'un aimant permanent. Les magnétos, à cause de la faible intensité

du champ magnétique, sont employées pour de faibles puissances (allumage des moteurs à explosion, éclairage des bicyclettes...)

Dans la **dynamo**, l'inducteur est constitué d'un électro-aimant. L'excitation de l'électro-aimant peut être obtenue par un courant auxiliaire fourni par une source indépendante de la dynamo (excitation séparée) ou par le courant fourni par la dynamo elle-même

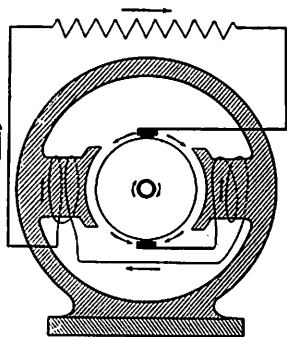


Fig. 341.

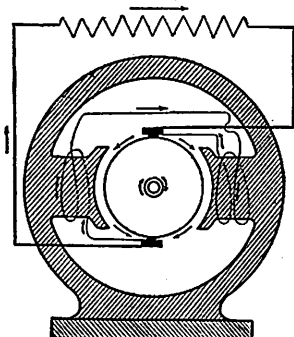


Fig. 342.

(auto-excitation). Dans ce cas, qui est le plus fréquent, l'enroulement de l'inducteur peut être en série (fig. 341), en dérivation (fig. 342), ou partie en série et partie en dérivation avec le circuit extérieur : on a respectivement la dynamo-série, la dynamo-shunt ou la dynamo-compound.

L'excitation de l'inducteur par le courant fourni par la dynamo elle-même semble constituer un cercle vicieux : pour produire le courant induit, l'inducteur doit être excité et le courant d'excitation est emprunté au courant induit. Il n'en est rien cependant : à cause du magnétisme rémanent de l'électro-aimant, la rotation de l'induit produit un courant de faible intensité ; ce courant, en circulant dans les bobines inductrices, augmente l'aimantation de l'inducteur dont le flux est renforcé. L'intensité du courant induit augmente, le flux inducteur est à nouveau renforcé et ainsi de suite... La dynamo est amorcée.

270. INDUIT. — L'induit mobile est centré dans la cavité cylindrique formée par les armatures en fer doux de l'inducteur.

a) **Induit en anneau ou induit Gramme** (fig. 343). — L'anneau en fer doux, qui canalise les lignes de force du champ inducteur, est constitué de couronnes circulaires isolées les unes des autres par de la gomme-laque pour éviter les courants de Foucault. Cet anneau sert de noyau à un nombre pair de bobines en fil de cuivre isolé. Ces bobines sont reliées entre elles par l'intermédiaire de barres de cuivre appelées **touches**.

b) **Induit en tambour ou induit Siemens** (fig. 344). — En raison de divers avantages qu'il présente, on utilise actuellement l'induit en tambour. Un cylindre de fer doux sert de noyau à une série de cadres en fil de cuivre isolé. Ces cadres, dont le fil est bobiné sur tout le

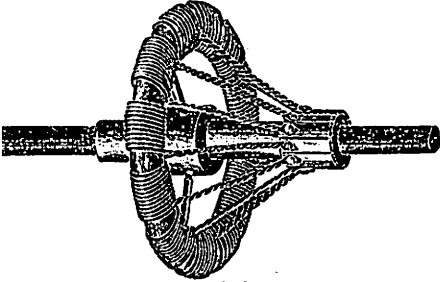


Fig. 343.

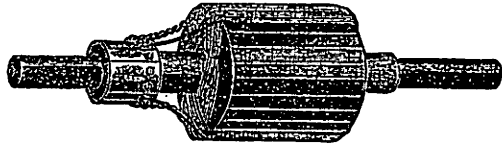


Fig. 344.

cylindre en fer doux, sont reliés entre eux par l'intermédiaire des touches.

271. COLLECTEUR. — Les touches qui relient les bobines ou les cadres sont séparées les unes des autres par une matière isolante et sont fixées sur l'arbre moteur de l'induit (fig. 345). Les touches, lors de leur passage par la ligne neutre, sont mises en contact avec les balais B et B'. Touches et balais forment le collecteur. Les balais constituent les pôles du générateur : ils sont donc reliés aux fils de ligne du circuit qui utilise le courant.

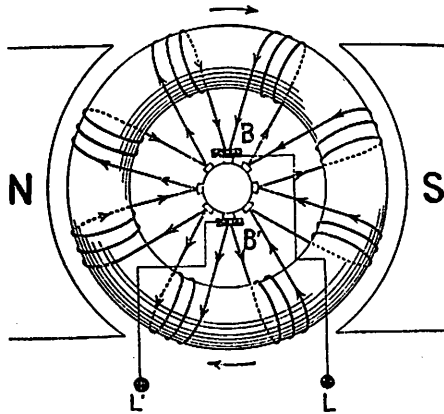


Fig. 345.

***272. — FORCE ÉLECTROMOTRICE DU GÉNÉRATEUR.**

— Le flux \mathcal{F} de l'inducteur se partage en deux parties égales dans chaque moitié de l'anneau. La force électromotrice induite dans une spire est donnée par la relation (n° 261) :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}$$

La vitesse de variation de flux et, par conséquent, la force électromotrice induite sont minima aux positions 1 et 3, maxima aux positions 2 et 4 (fig. 340). Cependant pour chaque quart de tour, la variation de flux à travers une spire vaut toujours $\mathcal{F}/2$; pour chaque tour, la variation de flux à travers une spire vaut donc : $2 \mathcal{F}$. La force

électromotrice moyenne induite dans une spire est, T désignant le temps mis par la spire pour effectuer un tour complet (période) :

$$E = 10^{-8} \cdot \frac{2\mathcal{F}}{T}$$

Si la spire fait N tours par seconde ($NT = 1$), la force électromotrice moyenne induite dans la spire vaut :

$$E = 10^{-8} \cdot 2\mathcal{F} \cdot N$$

Si l'induit comporte n spires, la force électromotrice du générateur vaut, puisque les spires sont groupées en deux séries disposées en parallèle, chacune de ces séries comportant $n/2$ spires :

$$E = 10^{-8} \cdot 2\mathcal{F} \cdot N \cdot \frac{n}{2} \quad \text{ou} \quad \boxed{E = 10^{-8} Nn\mathcal{F}}$$

La force électromotrice d'un générateur mécanique est proportionnelle au flux de l'inducteur, au nombre de tours par seconde de l'induit et au nombre de spires que comporte l'induit.

273. RENDEMENT DU GÉNÉRATEUR. — Le rendement des générateurs mécaniques (rapport de l'énergie électrique recueillie à l'énergie mécanique fournie) est de l'ordre de 85 à 95 % ; il est par conséquent très élevé. Les pertes d'énergie sont dues aux frottements de l'arbre moteur, à l'échauffement par effet Joule des conducteurs de l'induit et de l'inducteur, à l'échauffement par hystérésis et par les courants de Foucault des noyaux de l'induit.

2. MOTEURS.

274. RÉVERSIBILITÉ DE LA DYNAMO. — La dynamo est

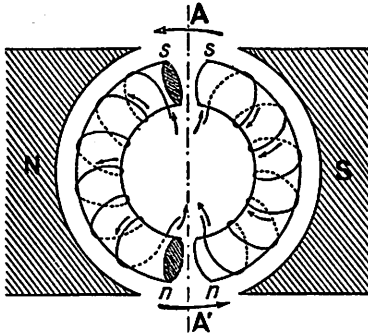


Fig. 346.

une machine réversible. Relions l'un des balais à la borne positive et l'autre balai à la borne négative d'un générateur. Le courant bifurque dans l'induit (fig. 346) : le courant qui parcourt la partie de l'induit située à droite de la ligne AA' est de sens inverse au sens du courant qui parcourt la partie de l'induit située à gauche de la ligne AA' . L'induit est comparable à deux solénoïdes courbes. Les pôles s des solénoïdes sont attirés par le pôle Nord N de l'inducteur et repoussés par le pôle Sud S de l'inducteur. Les pôles n des solénoïdes sont repoussés par le pôle Nord N de l'inducteur et attirés par le pôle Sud S de l'inducteur. Les actions de l'inducteur sur les deux solénoïdes concordent à faire tourner l'induit dans le sens indiqué par les flèches. La rotation de l'induit

ne change rien à la disposition dans l'espace des solénoïdes en sorte que les forces électromagnétiques restent constantes en grandeur, direction et sens. La dynamo fonctionne comme réceptrice; elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique et constitue donc un moteur électrique.

***275. FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE DU MOTEUR.**

— La rotation de l'induit développe dans ses spires un courant induit de sens inverse au sens du courant qui le fait tourner (n° 259). La force contre-électromotrice développée dans l'induit vaut (n° 272):

$$E' = 10^{-8} N n \mathcal{F}$$

L'intensité du courant dans le moteur vaut, si U et R désignent respectivement la tension aux bornes et la résistance du moteur (n° 194) :

$$I = \frac{U - E'}{R}$$

Au démarrage, la force contre-électromotrice est nulle puisque le moteur ne tourne pas ($N = 0, E' = 0$); l'intensité du courant dans le moteur ($I = U/R$) serait très élevée si on ne la limitait pas par un rhéostat de démarrage. Le rendement des moteurs est du même ordre que celui des générateurs; les pertes d'énergie sont dues aux mêmes causes.

3. TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE.

276. PERTE D'ÉNERGIE PAR TRANSMISSION. — Fréquemment, la source d'énergie (centrale thermique, houille blanche) est très éloignée du lieu d'utilisation. L'installation d'un générateur à la source d'énergie, de fils conducteurs (fils de ligne) et d'un moteur au lieu d'utilisation résout d'une façon pratique l'important problème de la transmission de l'énergie. Dans les fils de ligne, il se produit par effet Joule une perte de puissance exprimée par la relation RI^2 . Pour réduire cette perte au minimum, on ne peut songer à diminuer la résistance R de la ligne par l'emploi de câbles de très grosse section : solution trop onéreuse; on doit donc diminuer l'intensité I du courant : solution nécessitant l'emploi d'une haute tension si l'on veut conserver la puissance ($W = UI$). Le courant continu ne peut être obtenu aux hautes tensions désirables tandis que le courant alternatif, par la facilité de transformation qu'il présente, peut être obtenu à des tensions de l'ordre de 200 000 V. Le courant alternatif est donc plus avantageux pour la transmission de l'énergie à distance.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Une chute d'eau d'une puissance de 6 ch actionne, par l'intermédiaire d'une turbine, une dynamo série dont la résistance totale est de 3 Ω . L'induit de la dynamo porte 800 spires. Lorsque la dynamo tourne au régime de 800 tours-minute, la tension aux bornes est de 300 V et le courant fourni au circuit extérieur est de 6 A. Calculer : a) la force électromotrice de la dynamo; b) le rendement électrique et le rendement global du moteur-générateur; c) l'induction produite dans l'induit sachant que la section de l'anneau de fer doux est de 150 cm².

SOLUTION. — a) La force électromotrice est donnée par la loi d'Ohm - 2^o forme :

$$E = I(R_e + r_i); E = IR_e + Ir_i; E = U + Ir_i; E = 300 + 6 \cdot 3 = 318 \text{ V.}$$

$$\text{b) Rendement électrique} = \frac{\text{Tension aux bornes}}{\text{Force électromotrice}} = \frac{300}{318} = 0,945.$$

$$\text{Rendement global} = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance fournie}} = \frac{300 \cdot 6}{736 \cdot 6} = 0,408.$$

c) De la relation $E = 10^{-8} \mathcal{F} n N$, on tire :

$$\mathcal{F} = 10^8 \frac{E}{nN}; \mathcal{F} = \frac{10^8 \cdot 318 \cdot 60}{800 \cdot 800} = 3 \cdot 10^6 \text{ Mx.}$$

$$B = \frac{\mathcal{F}}{2S}; B = \frac{3 \cdot 10^6}{2 \cdot 150} = 10\,000 \text{ Gs.}$$

2. Un moteur fonctionne sous 120 V avec un courant de 5 A en marche normale. Le moteur étant bloqué, l'intensité du courant est de 40 A. Calculer : a) la force contre-électromotrice du moteur; b) le rendement électrique du moteur; c) la puissance utile, exprimée en ch, du moteur. On néglige les frottements.

SOLUTION. — a) Avec le moteur bloqué, on a : $I = \frac{U}{r_i}$

$$r_i = \frac{U}{I}; r_i = \frac{120}{40} = 3 \Omega.$$

En marche normale, on a : $I = \frac{U - E'}{r_i}$

$$E' = U - I r_i; E' = 120 - 5 \cdot 3 = 105 \text{ V.}$$

$$\text{b) Rendement électrique : } R_t = \frac{E'}{U}; R_t = \frac{105}{120} = 0,875$$

$$\text{c) Puissance utile : } W = E' I; W = 105 \cdot 5 = 525 \text{ W ou } 0,715 \text{ ch.}$$

3. Deux machines électriques identiques dont les inducteurs sont en série servent à un transport d'énergie à 1 km de distance. Chaque machine a une résistance de 0,1 Ω . Les fils de ligne, en cuivre ($\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$), présentent un diamètre de 4 mm. La génératrice, qui tourne au régime de 600 tours-minute, développe une force électromotrice de 400 V et fournit un courant de 60 A. Calculer : a) la puissance du moteur; b) le rendement électrique du transport; c) la répartition des pertes; d) le rendement électrique du transport si la force électromotrice, par suite d'une autre vitesse de rotation, est triplée.

SOLUTION. — a) Résistance des fils de ligne

$$R = \rho \frac{l}{s}; R = \frac{1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 2,55 \Omega.$$

$$\text{Résistance totale du circuit : } R = 2,55 + 0,1 + 0,1 = 2,75 \Omega.$$

Force contre-électromotrice du moteur :

$$E' = E - I R; E' = 400 - 2,75 \cdot 60 = 235 \text{ V.}$$

$$\text{Puissance du moteur : } W' = E' I; W' = 235 \cdot 60 = 14\,100 \text{ W ou } 14,1 \text{ kW.}$$

b) Puissance fournie au générateur :

$$W = E I; W = 400 \cdot 60 = 24\,000 \text{ ou } 24 \text{ kW.}$$

$$\text{Rendement du transport : } R_t = \frac{W'}{W}; R_t = \frac{14,1}{24} = 0,588.$$

c) Perte de puissance due au transport : $24 - 14,1 = 9,9 \text{ kW}$ soit 41,2 %.

Perte dans le générateur : $I^2 r_i = 60^2 \cdot 0,1 = 360 \text{ W}$ soit 1,5 %.

Perte en ligne : $I^2 R = 60^2 \cdot 2,55 = 9\,180 \text{ W}$ soit 38,2 %.

Perte dans le moteur : $I^2 r_i = 60^2 \cdot 0,1 = 360 \text{ W}$ soit 1,5 %.

d) La puissance fournie étant de 24 kW et la force électromotrice du générateur étant de 1 200 V, l'intensité du courant dans le circuit est :

$$I = \frac{W}{E}; I = \frac{24\,000}{1\,200} = 20 \text{ A.}$$

La perte totale due au transport est, dans ce cas :

$$I^2 R = 20^2 \cdot 2,75 = 1\,100 \text{ W soit } 4,5 \text{ \%}.$$

Le rendement électrique du transport est donc de 0,955.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Un cadre plat circulaire comportant 50 spires de 20 cm de diamètre est placé verticalement dans le plan du méridien magnétique. Au centre du cadre est orientée une petite aiguille aimantée mobile dans le plan horizontal. Lorsqu'on lance un courant dans le cadre, l'aiguille dévie de 45°. Calculer l'intensité du courant ($H_t = 0,2$ Oe). R : 0,0637 A

2. Une bobine horizontale de 4 cm de diamètre comporte 500 spires disposées sur une longueur de 60 cm. On y lance un courant de 0,3 A. Suivant que l'axe de la bobine est orienté parallèlement ou perpendiculairement au méridien magnétique ($H_t = 0,2$ Oe), calculer le flux à travers une section centrale de la bobine : a) lorsqu'elle est vide de matière magnétique; b) lorsqu'elle contient de la fonte ($\mu = 600$); c) lorsqu'elle contient du fer ($\mu = 3\,000$). R: a) 42 Mx et 39,5 Mx; b) 25 200 Mx et 23 700 Mx; c) 126 000 Mx et 118 500 Mx.

3. Un cadre rigide de 40 cm de côté mobile autour d'un axe vertical comporte 200 spires parcourues par un courant de 0,3 A. Le cadre se trouve dans un champ magnétique uniforme et horizontal de 70 Oe. A quelles forces est soumis ce cadre : a) lorsqu'il est disposé parallèlement aux lignes de force; b) lorsqu'il est disposé perpendiculairement aux lignes de force? R : a) à un couple qui tend à le faire tourner de 90°, le moment de ce couple est 336 000 dyn.cm; b) chaque côté est soumis à une force perpendiculaire au côté, dirigée dans le plan du cadre et égale à 8 400 dyn.

4. Deux petits conducteurs parallèles de l cm de longueur, distants de d cm sont parcourus par des courants de même sens de I A. Calculer la force d'attraction des conducteurs. R : $F = \frac{I^2 l^2}{100 d^2}$

5. Sur une bobine en carton de 4 cm de diamètre et de 20 cm de longueur, on enroule en spires équidistantes un fil de cuivre de 25 m de longueur et de 4Ω de résistance. On réunit les extrémités du fil aux bornes d'une batterie formée de 4 accumulateurs ($E = 2$ V; $r_i = 0,05 \Omega$). L'intérieur de la bobine est occupé par un noyau de fer doux pour lequel le coefficient de perméabilité μ est 500. Une armature en fer de 10 cm^2 de surface est en contact avec le noyau de fer de l'électro-aimant ainsi formé. Calculer en kg la force portante de cet électro-aimant. R : 59 kg.

6. Le fil télégraphique qui réunit la station A et la station B distantes de 60 km est parcouru par un courant de 35 mA. Par suite d'un accident, un court circuit se produit sur la ligne; l'intensité du courant mesuré à la station A est de 140 mA. Déterminer à quelle distance de A s'est produit le court-circuit. R : à 15 km de A.

7. Une bobine A de 10 cm de diamètre et de 50 cm de longueur comporte 1 000 spires. Une bobine B de 8 cm de diamètre, centrée sur le même axe, est placée à l'intérieur de la bobine A; elle comporte 200 spires sur une longueur de 20 cm. On lance dans la bobine extérieure un courant de 0,5 A; le courant par suite de la self de la bobine met $1/50$ s pour prendre son intensité maximum. Lors de l'ouverture du circuit, le courant cesse en $1/200$ s. Calculer la force électromotrice d'induction lors de la fermeture et de l'ouverture du circuit : a) lorsque la bobine B est vide de matière magnétique; b) lorsque la bobine B a un noyau en fer doux ($\mu = 500$). R : a) 0,063 V et 0,252 V; b) 31,5 V et 126 V.

8. La bobine B de l'exercice précédent est reliée aux bornes d'un galvanomètre balistique. La résistance totale du circuit est de $1\,000 \Omega$. Sachant que le galvanomètre dévie d'une division pour un microcoulomb, calculer dans les différents cas la déviation du galvanomètre. R : a) 1,25; b) 625.

9. Une barre verticale isolée de 50 cm de hauteur se déplace parallèlement à elle-même et perpendiculairement au méridien magnétique dans le champ magnétique terrestre dont la composante horizontale vaut 0,2 Oe. Elle se déplace à la vitesse de 4 m /s. Quelle est la différence de potentiel aux extrémités de la barre? R : $4 \cdot 10^{-5}$ V.

10. Etablir l'équation qui donne le coefficient de self L d'une bobine en fonction de ses caractéristiques géométriques. R : $L = 10^8 \frac{4,7^2 N^2 r^2}{10l}$.

11. L'induit d'une dynamo-shunt est formé d'un fil de 4Ω de résistance; les deux bobines de l'inducteur, placées en dérivation, présentent chacune une résistance de 120Ω . Dans le circuit extérieur de 30Ω le courant est de 4 A . On demande : a) la tension aux bornes; b) l'intensité du courant dans chaque branche de l'induit; c) la force électromotrice de la dynamo; d) la puissance de la dynamo; e) le rendement électrique de la dynamo. R : a) 120 V ; b) $2,25 \text{ A}$; c) $124,5 \text{ V}$; d) $560,25 \text{ W}$; e) $96,5 \%$.

12. L'induit d'une dynamo à excitation séparée comportant 200 spires tourne à raison de 1800 tours/minute. Les bornes de la dynamo étant en court circuit, l'intensité du courant fourni par la dynamo atteint 10 A . Lorsque la résistance extérieure est constituée de 30 lampes de 600Ω chacune, l'intensité du courant est tombée à 1 A , le régime de rotation de la dynamo n'ayant pas varié. On demande : a) la force électromotrice de la dynamo; b) le flux fourni par l'inducteur; c) l'induction dans l'induit sachant que la section de ce dernier est 200 cm^2 . R : a) 120 V ; b) $2 \cdot 10^6 \text{ Mx}$; c) 10^4 Gs .

13. L'induit d'une dynamo à excitation séparée comportant 400 spires et présentant une résistance de 2Ω tourne à raison de 800 tours/minute. Ce générateur fournit un courant de 10 A lorsque la résistance extérieure est constituée de 30 lampes de 600Ω chacune, disposées en dérivation. Lorsque la résistance extérieure n'est plus constituée que de 10 lampes, l'intensité du courant tombe à 4 A ; la dynamo pour absorber la même énergie mécanique tourne plus vite. Calculer : a) la force électromotrice du générateur dans les deux cas; b) le flux de l'inducteur; c) la vitesse de rotation du générateur dans les deux cas; d) le rendement électrique du générateur dans les deux cas; e) le rendement global du générateur sachant que 5% de l'énergie fournie sont utilisés à vaincre les frottements; f) l'intensité du courant si on met les bornes du générateur en court-circuit, la vitesse de rotation passant à 1200 tours/minutes. R : a) 220 V et 248 V ; b) $4125 \cdot 10^8 \text{ Mx}$; c) 900 tours/minute; d) $90,9 \%$ et $96,8 \%$; e) $86,5 \%$ et $91,9 \%$; f) 165 A .

14. Une dynamo de 300 volts de force électromotrice alimente un moteur. Moteur et générateur ont tous deux une résistance de 10 ohms. a) On demande la résistance à intercaler au démarrage du moteur, le fusible du circuit ne pouvant supporter une intensité supérieure à 5 ampères; b) Quelle est la force contre-électromotrice du moteur sachant que l'intensité est, en marche normale, de 4 ampères? c) Quel est le rendement électrique du moteur? R : a) 40Ω ; b) 220 V ; c) $11/13$.

15. Un générateur présentant une force électromotrice constante de 110 V et une résistance de 1Ω alimente un moteur et une résistance de 8Ω disposée en série avec le moteur. Le moteur étant bloqué, on lit une intensité de 10 A . Le moteur étant en marche normale, on lit une intensité de 2 A . Calculer : a) la résistance ohmique du moteur; b) la force contre-électromotrice du moteur; c) la tension aux bornes du générateur; d) la tension aux bornes du moteur; e) la puissance exprimée en ch du moteur. R : a) 2Ω ; b) 88 V ; c) 108 V ; d) 92 V ; e) $0,24 \text{ ch}$.

16. Un moteur électrique dont la résistance interne est de 2Ω est branché sur une ligne électrique sous une tension de 110 V . On suppose que le flux magnétique dans l'entrefer du moteur reste constant. Lorsque le moteur tourne à vide, la vitesse de rotation est 1200 tours/minute. On demande d'exprimer en fonction du nombre de tours N : a) l'intensité du courant qui traverse le moteur; b) la force contre-électromotrice; c) la puissance électrique; d) le rendement du moteur. R : $I = 55 - 0,046 N$; b) $E' = 0,092 N$; c) $5,06 N - 0,004 232 N^2$; d) $N/1200$.

17. Une machine à vapeur de 20 ch actionne une dynamo-série qui envoie un courant de 30 A à un moteur identique à la dynamo. Ce moteur est situé à 3 km de la dynamo. 10% de l'énergie fournie à la dynamo et au moteur sont absorbés par des frottements mécaniques. La résistance interne de la dynamo et du moteur est $0,5 \Omega$; la résistance des fils de ligne est 2Ω . On demande : a) la force électromotrice de la dynamo; b) la tension aux bornes du moteur; c) le rendement électrique du moteur; d) le rendement électrique de la dynamo; e) la puissance extérieure du moteur en tenant compte du frottement mécanique; f) le rendement global du transport d'énergie en dressant le bilan des pertes. R : a) $441,6 \text{ V}$; b) $366,6 \text{ V}$; c) 96% ; d) $96,5 \%$; e) $12,9 \text{ ch}$; f) $64,5 \%$ (perte due au frottement : $3,4 \text{ ch}$; perte par effet Joule : $3,7 \text{ ch}$).

LECTURE

LES PIONNIERS DE L'ÉLECTRICITÉ

Prenez intérêt à ces demeures sacrées que l'on désigne du nom expressif de « laboratoires » ... Ce sont les temples de l'avenir, de la richesse et du bien-être. C'est là que l'humanité grandit, se fortifie et devient meilleure.

*comme
c'est
pour...*

L. PASTEUR.

GALVANI. — C'est une observation fortuite de Galvani, professeur d'anatomie à l'Université de Bologne (1737-1798) qui est à l'origine de la découverte du courant électrique. Pendant que Galvani dissèque une grenouille au voisinage d'une machine électrostatique en activité, son assistant remarque que les pattes de la grenouille se contractent à chaque étincelle de la machine. Va-t-il, un siècle avant Hertz, découvrir la télégraphie sans fil car ce sont les ondes électromagnétiques produites par l'étincelle qui provoquent, à distance, les contractions musculaires de la grenouille? Non : anatomiste, il s'intéresse à l'« électricité vivante ». Une seconde fois, le hasard lui est favorable : ayant suspendu un arrière-train de grenouille à une balustrade en fer par l'intermédiaire d'un crochet de cuivre, il observe que l'arrière-train de la grenouille se contracte violemment lorsque les pattes de la grenouille viennent au contact de la balustrade. Reliant par les muscles d'une grenouille les extrémités d'un arc métallique constitué d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc, il provoque les mêmes contractions musculaires. Galvani va-t-il découvrir la pile électrique? Non encore : anatomiste, il s'imagine que les phénomènes vitaux de la grenouille développent une électrisation qui charge, à la manière d'un condensateur, les lames de cuivre et de zinc. Nanti d'un matériel très simple, Galvani entreprend des tournées à travers toute l'Europe pour faire connaître au grand public ses découvertes. Quoiqu'elles soient parfois sujettes à la risée de ses collègues — ne surnomment-ils pas Galvani le « maître de danse des grenouilles » — les expériences de Galvani secouent le monde scientifique. Bientôt Galvani rencontre un adversaire de valeur : Volta.

VOLTA (fig. 347). — Volta, professeur de physique à l'Université de Paris (1745-1827) donne du phénomène observé par Galvani une toute autre explication : le contact zinc-cuivre de l'arc bimétallique est la source d'électricité et la grenouille n'est qu'un électroscope d'une sensibilité telle qu'elle manifeste par ses spasmes musculaires la différence de potentiel régnant entre les deux métaux en contact.

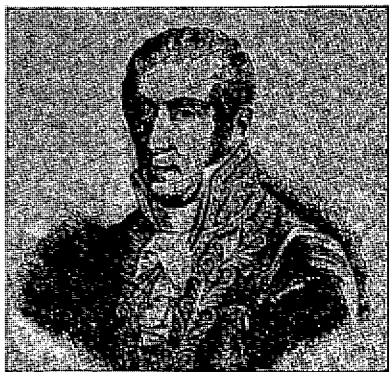


Fig. 347. — A. Volta.

A la suite de ces interprétations différentes s'élève, passionnant le monde savant, une longue controverse entre les tenants de l'« électricité animale » et les partisans de l'« électricité métallique »... Et finalement la théorie de Volta l'emporte. C'est au cours des expériences réalisées pour prouver le bien-fondé de ses vues que Volta est amené à intercaler entre le cuivre et

le zinc un morceau de drap imbibé d'eau légèrement acidulée c'est-à-dire à découvrir la pile en empilant des rondelles cuivre-zinc sur des rondelles de drap imprégné d'une solution diluée d'acide sulfurique. La pile électrique de Volta ne fournit plus une unique décharge comme le fait la bouteille de Leyde mais un courant continu comme s'écoule un torrent. Et les installations de piles électriques de se multiplier : Napoléon offre une pile de cinq cents éléments à l'École Polytechnique; les Anglais font cadeau à leur compatriote Davy d'une pile de deux mille éléments.

Si, grâce à l'invention de Volta, les applications basées sur le courant électrique prennent leur essor, l'énergie électrique fournie par les piles est trop onéreuse pour que ces applications puissent être industrialisées.

OERSTED. — Au cours d'une leçon donnée par Oersted à l'Université de Copenhague sur les effets calorifiques du courant (1819), les élèves remarquent que l'aiguille d'une boussole, placée fortuitement dans le voisinage d'un fil, dévie chaque fois qu'un courant est envoyé dans le fil. La découverte d'Oersted jette un pont entre l'électricité et le magnétisme.

AMPÈRE (fig. 348). — Quand Ampère apprend la sensationnelle découverte d'Oersted, il décide de se consacrer au nouveau problème. Qui est Ampère? Ampère voit le jour à Lyon en 1775. La vie lui réserve les plus dures épreuves : il a 18 ans quand son père meurt sur l'échafaud; il n'est marié que de quatre ans lorsque sa compagne est emportée par la maladie... Doué d'un caractère tenace, d'une intelligence prodigieuse..., Ampère se donne tout entier aux mathématiques et aux sciences : il y trouve un dérivatif à ses malheurs.

Ampère apprend l'expérience d'Oersted le 11 septembre 1820. Quelques jours après, il annonce à l'Académie des Sciences qu'il a donné à l'expérience d'Oersted une forme nouvelle (18 septembre); il suggère à Arago de placer à l'intérieur d'une bobine parcourue par un courant un morceau de fer pour l'aimanter au maximum et invente du même coup l'électro-aimant (24 septembre) ... Et les mémoires d'Ampère à l'Académie des Sciences se succèdent : il annonce l'action d'un aimant sur un courant, d'un courant sur un courant... En quelques semaines de 1820, ce génie bâtit l'œuvre monumentale de l'électromagnétisme.



Fig. 348. — J.-M. Ampère.

FARADAY (fig. 349). — Ne reste-t-il rien à glaner après Ampère? Si Ampère a découvert l'action d'un aimant sur un courant, la production d'un courant par un aimant lui a échappé. L'induction électromagnétique sera l'œuvre de Faraday.

Et cependant... Avant Faraday, un physicien suisse, Colladon, avait eu l'intuition de l'induction électromagnétique. Il passa... à côté de la découverte de l'induction électromagnétique dans des circonstances qui méritent d'être notées. Craignant que l'aiguille du galvanomètre ne subit l'action directe de l'aimant introduit dans un solénoïde, Colladon a la malencontreuse

idée de placer le galvanomètre dans la pièce voisine de celle dans laquelle il dispose le solénoïde. Après avoir introduit l'aimant dans la bobine, il court consulter son galvanomètre : hélas ! l'aiguille qui avait dévié lors de l'introduction de l'aimant est revenue au zéro. Colladon avait frisé l'immortalité.



Photo Larousse.
La science et ses applications.

Fig. 349. — M Faraday.

Fils d'un pauvre maréchal-ferrant anglais, Faraday travaille, dès l'âge de treize ans, chez un relieur. Esprit curieux, il lit souvent les ouvrages qu'il relie : c'est ainsi qu'en parcourant les « Conversations sur la chimie » de Jeanne Maret, il se sent attiré vers les sciences. Enrôlé comme préparateur, voire comme valet de chambre par Davy, Faraday est plongé dans la chimie. En 1823, il réussit à liquéfier le gaz sulfureux, le gaz chlorhydrique, le gaz sulfhydrique, le cyanogène et le chlore. En 1825, il est directeur de laboratoire. En 1831, il lit à la « Royal Society » le premier d'une longue série de mémoires sur « Des recherches expérimentales en électricité » : alors qu'Ampère, Fresnel, Arago, Seebeck... échouent dans leurs essais de produire le courant électrique dans une bobine entourant un aimant, Faraday réussit à merveille à produire des courants d'induction : « On a voulu, dit-il, déceler le passage du courant une fois l'aimant placé dans une bobine : c'est un tort. C'est

seulement quand on introduit l'aimant ou quand on retire l'aimant qu'un courant se produit » (1).

Les machines basées sur l'induction électromagnétique permettent d'obtenir le courant électrique dans des conditions beaucoup plus avantageuses que les piles : dès sa découverte, « l'induction électromagnétique laisse entrevoir la naissance de la dynamo, reine du monde moderne, et, derrière elle, les barrages hydroélectriques, les centrales géantes, les lignes à haute tension, l'auto, l'avion » (1).

Célèbre par sa découverte de l'induction électromagnétique, Faraday n'en poursuit pas moins ses travaux. De 1832 à 1834, il réussit à formuler les lois fondamentales de l'électrolyse. En 1845, il reprend ses recherches sur la liquéfaction des gaz : il liquéfie l'éthylène et l'hydrogène phosphoré ; il ne liquéfie toutefois pas l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, gaz qu'il qualifie de permanents quoiqu'il soit persuadé qu'ils seront liquéfiés et solidifiés un jour.

(1) Pierre Rousseau, « Histoire de la Science », pp. 464 et 467. A Fayard, éditeur.

GRAMME (fig. 350). — Les découvertes de science pure ne donnent pas immédiatement naissance aux réalisations pratiques. Cependant, dès la découverte de l'induction électromagnétique, les ingénieurs se mettent à produire du courant électrique en faisant aller et venir l'inducteur (aimant) dans l'induit (solénoïde). Ils essaient bientôt de transformer le mouvement alternatif peu commode en mouvement rotatif très commode. Zénobe Gramme (ouvrier belge : 1826-1901) imagine d'enrouler un fil autour d'un anneau en fer doux : il construit la première dynamo. Mais Gramme ne se doute nullement que son générateur électrique peut fonctionner en moteur électrique; il ignore que sa machine est réversible. « A l'Exposition de Vienne, en 1873, deux machines de Gramme avaient été prévues pour les démonstrations devant le public, la seconde à titre de secours; par suite de l'erreur d'un ouvrier, la machine de secours resta branchée sur le circuit; au moment où l'on fit tourner la première au moyen d'une machine à vapeur, Fontaine vit avec stupéfaction la machine n° 2 se mettre en marche ! Telle fut l'histoire, deux fois illogique, de la découverte du moteur électrique et des « transports de force ».



Photo Larousse.
La science et ses applications.
Fig. 350. — Z. Gramme.

— A l'Exposition de 1881, raconte d'Arsonval, le physicien Froelich faisait une savante conférence sur les dynamos. J'étais assis entre Gramme et Fontaine. A la fin de la conférence, où il avait consciencieusement dormi, le père Gramme s'éveilla et contempla avec effroi le tableau noir couvert d'équations et d'intégrales :

— Ah ! docteur, me dit-il, je n'aurais jamais inventé ma machine s'il m'avait fallu m'embarrasser de tous ces portemanteaux ! (1)

La théorie n'est jamais en peine pour expliquer les inventions que l'on a faites sans elle; mais c'est elle qui leur donne leur généralité et leur prix » (2).

Grâce à l'invention des transformateurs (Ruhmkorff), va bientôt se tisser sur le monde une vaste toile de fils à haute tension. Entretemps, le télégraphe (Gauss), le téléphone (Bell), la lampe à incandescence (Edison), l'accumulateur (Planté), la télégraphie sans fil (Hertz)... voient le jour.

Le XIX^e siècle est le siècle de l'électricité.

(1) Le signe intégrale est \int

(2) L. de Broglie, « Avenir de la Science »; P. Devaux, « Prophètes et inventeurs », pp. 193 et 194. Plon, éditeur.

CHAPITRE V.

ÉLECTROMÉTRIE.

§ 1. MESURE DES INTENSITÉS.

1. GALVANOMÈTRES.

Les galvanomètres sont des appareils destinés à déceler ou à mesurer des courants de très faible intensité. Les uns sont à aimant mobile, les autres sont à cadre mobile.

277. GALVANOMÈTRE DE NOBILI (fig. 351). — Le galvanomètre de Nobili comporte un système astatique (n^o 233) formé de deux aiguilles aimantées dont l'une est située au centre d'une bobine comprenant plusieurs spires (multiplicateur). Une des deux aiguilles se déplace devant un cadran gradué. Le système astatique est suspendu à un mince fil d'argent.

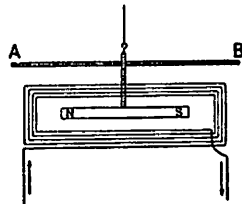


Fig. 351.

Lors de l'emploi, le galvanomètre est orienté de façon que l'enroulement du multiplicateur soit parallèle aux aiguilles aimantées. Sous l'action d'un courant, même très faible, les aiguilles aimantées qui tendent à se mettre perpendiculairement à l'enroulement du multiplicateur tournent jusqu'à ce que le couple électromagnétique soit équilibré par le couple de torsion créé dans le fil de suspension. Pour graduer l'appareil, on lance dans le multiplicateur des courants d'intensité régulièrement croissante et on note les déviations correspondantes de l'aiguille indicatrice.

278. GALVANOMÈTRE A AIMANT MOBILE (fig. 352). — L'appareil comporte un barreau aimanté disposé au centre d'une bobine comprenant plusieurs spires (multiplicateur). Sous l'action d'un courant passant dans le multiplicateur, le barreau aimanté bascule, soit à gauche soit à droite selon le sens du courant, entraînant avec lui une aiguille indicatrice. Ce galvanomètre, très pratique car ses indications sont visibles de tout un auditoire, n'est cependant pas d'une grande sensibilité.

279. GALVANOMÈTRE A CADRE MOBILE (fig. 353). — Le galvanomètre de Deprez et d'Arsonval comprend un cadre rectangulaire mobile autour de l'axe vertical AA' et un aimant en fer à cheval NS. Le cadre formé de quelques spires est disposé parallèlement aux lignes de force du champ magnétique de l'aimant.

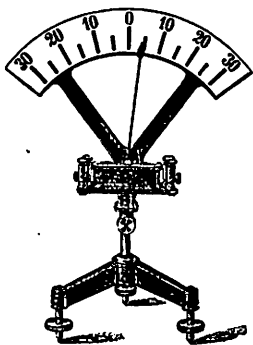


Fig. 352.

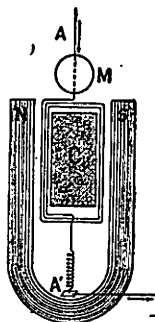


Fig. 353.

Lorsqu'un courant y circule, le cadre, qui tend à s'orienter normalement aux lignes de force, tourne jusqu'à ce que le couple électromagnétique soit équilibré par le couple de torsion créé dans le fil de suspension du cadre. L'angle de rotation se mesure par le déplacement subi par un rayon lumineux tombant sur un miroir M solide du cadre.

On augmente dans de très fortes proportions la sensibilité de cet appareil en disposant, à l'intérieur du cadre mobile, un cylindre C en fer doux. Ce cylindre augmente l'intensité de la force électromagnétique créée par le passage du courant dans le cadre. L'appareil ainsi modifié permet de mesurer des courants de l'ordre du milliardième d'ampère.

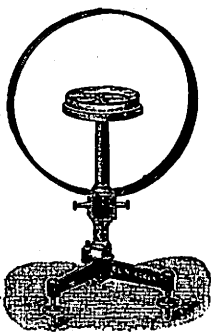


Fig. 354.

***280. BOUSSOLE DES TANGENTES.**—

La boussole des tangentes comporte une spire métallique verticale au centre de laquelle est située une aiguille aimantée, très courte, mobile dans le plan horizontal (fig. 354). Une longue aiguille d'aluminium, solidaire de cette aiguille aimantée, en indique le déplacement le long d'une graduation.

Préalablement à toute mesure, la spire est orientée dans le méridien magnétique. Le courant est ensuite lancé dans le ruban métallique qui constitue la spire. L'aiguille aimantée est soumise à l'action de la composante

horizontale H_t du champ magnétique terrestre dirigé dans le plan de la spire ainsi qu'à l'action du champ magnétique H_e créé par le courant et perpendiculaire au plan de la spire : l'aiguille dévie d'un angle α et prend la direction définie par celle du champ résultant H_{rt} (fig. 355). L'angle α dont a tourné l'aiguille est donné par la relation :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_e}{H_t}$$

Or, le champ magnétique H_e au centre de la spire métallique vaut : $H_e = \frac{2\pi I}{10d}$ (n° 238). Nous avons donc :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H_e}{H_t}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{2\pi I}{10d H_t}; \operatorname{tg} \alpha = \frac{2\pi I}{10d H_t}$$

D'où nous tirons :

$$I = \frac{10d H_t}{2\pi} \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

Or, le rapport $\frac{10d H_t}{2\pi}$ est, en un point déterminé du globe, une constante qui caractérise l'appareil. Il vient donc

$$I = K \operatorname{tg} \alpha$$

L'intensité du courant est proportionnelle à la tangente de l'angle de déviation.

***281. GALVANOMÈTRE BALISTIQUE.** — Lorsqu'un galvanomètre à aimant mobile est traversé par un courant de très courte durée, l'aiguille subit une impulsion, dévie d'un angle α et revient au zéro après avoir effectué quelques oscillations. Si le courant est terminé avant que l'aiguille se soit sensiblement déplacée, l'angle d'impulsion α est proportionnel à la quantité d'électricité q qui a traversé le galvanomètre.

$$\alpha = kq.$$

Le coefficient de proportionnalité k de l'appareil est déterminé en mesurant l'angle α dont dévie l'aiguille lors de la décharge d'un condensateur de potentiel et de capacité connus.

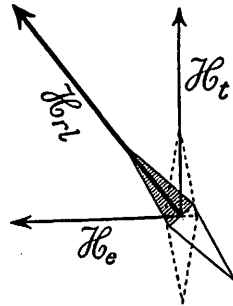


Fig. 355

282. EMPLOI DES GALVANOMÈTRES. — Les galvanomètres sont délicats à manier; ils ne supportent que des courants de très faible intensité (jusqu'au millionième d'ampère) à cause de la faible section de leur enroulement. On étend leur limite d'emploi par l'usage de shunt (n° 156).

2. AMPÈREMÈTRES.

Les ampèremètres sont des appareils plus robustes que les galvanomètres. Destinés à être branchés en série dans le circuit, ces appareils doivent présenter une résistance très faible pour ne pas affaiblir l'intensité à mesurer.

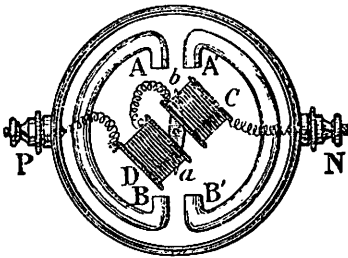


Fig. 356.

283. AMPÈREMÈTRE A AIMANT MOBILE (fig. 356).

— L'appareil comporte une palette en fer doux *ab* mobile dans un champ magnétique intense (200 oersteds) créé par deux aimants permanents *AB* et *A'B'* et une double bobine *CD* dont l'axe est incliné sur la direction du champ magnétique. La palette, aimantée par influence, s'oriente dans la direction du champ créé par les aimants : l'aiguille indicatrice solidaire de la palette indique zéro. Lorsque la double bobine *CD* est parcourue par le courant, la palette, qui tend à se placer dans l'axe de la bobine, dévie en entraînant avec elle l'aiguille indicatrice le long d'un cadran gradué.

284. AMPÈREMÈTRE A CADRE MOBILE (fig. 357). —

L'ampèremètre à cadre mobile se compose d'une bobine plate mobile autour d'un axe. Cette bobine, que deux ressorts spiralés maintiennent parallèle aux lignes de force d'un aimant permanent *NS*, entoure un cylindre en fer doux. Lorsqu'un courant la traverse, la bobine dévie et s'arrête quand le couple de torsion des ressorts équilibre le couple électromagnétique. La déviation de la bobine entraîne le déplacement de l'aiguille indicatrice le long d'un cadran gradué.

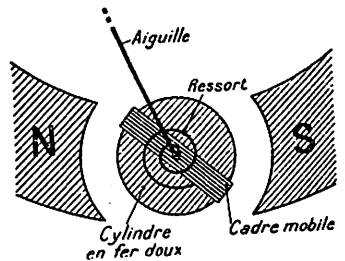


Fig 357.

285. AMPÈREMÈTRE THERMIQUE (fig. 358). — Dans l'ampèremètre thermique, le courant traverse un fil fin BB' qui s'échauffe. La dilatation du fil consécutive à l'échauffement dépend de la température à laquelle il est porté et, par conséquent, de l'intensité du courant qui le parcourt. Le fil, en se dilatant, fait tourner une poulie dont est solidaire l'aiguille indicatrice.

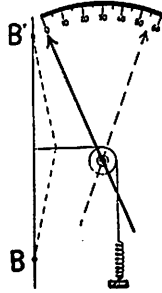


Fig. 358.

286. EMPLOI DES AMPÈREMÈTRES. — Les ampèremètres sont gradués par des courants dont l'intensité a été déterminée par des mesures d'électrolyse. Les ampèremètres à aimant et à cadre mobiles ne peuvent servir que pour la mesure des courants continus: ils ont une polarité c'est-à-dire que le courant doit parcourir l'appareil dans un sens déterminé. Les ampèremètres thermiques peuvent servir pour les courants continus et pour les courants alternatifs: ils n'ont pas de polarité, l'effet Joule étant indépendant du sens du courant.

§ 2. MESURE DES TENSIONS ET DES FORCES ÉLECTROMOTRICES.

287. VOLTMÈTRES. — Les voltmètres, destinés à mesurer la tension entre deux points, ne diffèrent des ampèremètres que par la très grande résistance ohmique qu'ils présentent.

Pour mesurer la tension entre deux points L et L' d'un circuit,

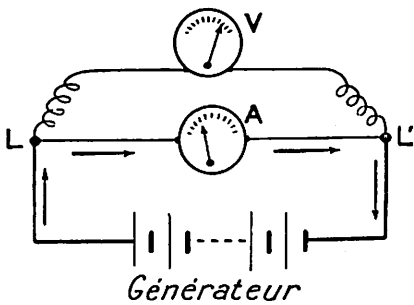


Fig. 359.

on intercale l'appareil en dérivation sur ces deux points (fig. 359). L'intensité du courant qui circule dans le voltmètre est proportionnelle à la tension régnant entre les points L et L' (en effet : $I = U/R$). La déviation de l'aiguille indicatrice peut donc servir à mesurer la tension entre les deux points considérés.

Les voltmètres sont toujours placés en dérivation; ils ne peuvent être shuntés.

***288. POTENTIOMÈTRE.** — On peut mesurer la force électromotrice d'un générateur en reliant à un voltmètre les bornes du générateur à circuit ouvert: cette méthode ne donne toutefois que des

résultats approximatifs. Pour obtenir des résultats précis, on utilise la méthode potentiométrique. On réalise le montage qu'indique la

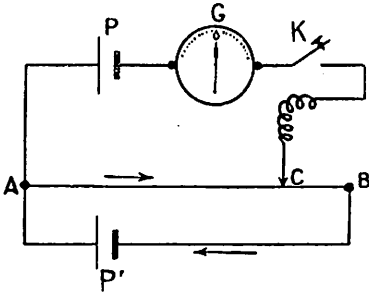


Fig. 360.

figure 360. Un accumulateur P', dont la force électromotrice est supérieure à la force électromotrice de la pile P à expérimenter, débite un courant dans un fil AB fin, homogène, de section constante. La chute de tension le long du fil AB est linéaire. La pile P est placée en opposition avec l'accumulateur P' : l'une des bornes de la pile est reliée par l'intermédiaire d'un galvanomètre G et d'un interrupteur K à un curseur C mobile le long du fil AB, l'autre borne de la pile est directement reliée au fil AB. L'interrupteur K étant fermé, on arrive, pour une position déterminée du curseur C, à annuler le courant dans le circuit de la pile. La force électromotrice x de la pile est alors exactement contre-balancée par la tension $V_A - V_C$. Cette tension est proportionnelle à la longueur l_1 de AC.

$$x = V_A - V_C ; \quad x = kl_1. \quad (1)$$

A la pile P, on substitue ensuite une pile étalon de force électromotrice E connue et on réalise le même équilibre; on trouve que, pour une longueur l_2 de AC', le courant est annulé dans le circuit de la pile.

$$E = V_A - V_C' ; \quad E = kl_2.$$

En faisant le rapport de la relation (1) à la relation (2), il vient :

$$\frac{x}{E} = \frac{l_1}{l_2} \quad \text{et} \quad x = E \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

§ 3. MESURE DES RÉSISTANCES.

289. MÉTHODE SIMPLE. — On intercale le conducteur dont on désire mesurer la résistance dans un circuit comprenant un générateur et un ampèremètre; on place un voltmètre en dérivation sur les extrémités du conducteur (fig. 359). Le voltmètre indique la tension U aux bornes du conducteur, l'ampèremètre indique l'intensité I du courant qui circule dans le conducteur. La résistance x du conducteur est donnée par la relation (loi d'Ohm) :

$$x = \frac{U}{I}.$$

290. MÉTHODE PAR SUBSTITUTION. — La résistance à mesurer et un ampèremètre sont disposés dans le circuit d'un

générateur de force électromotrice constante : on note l'intensité I du

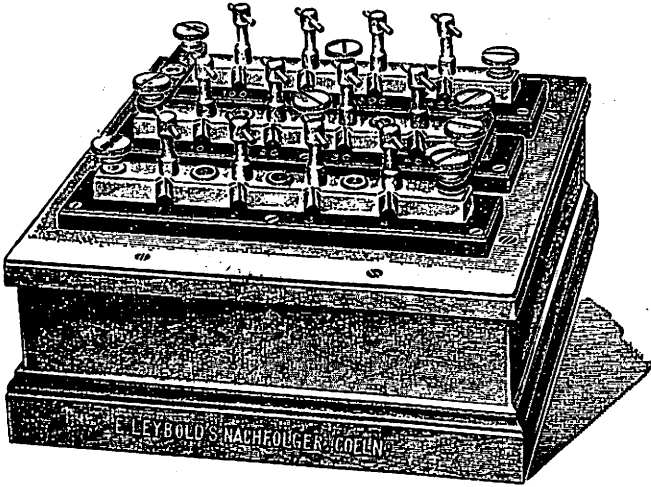


Fig. 361.

courant. On substitue ensuite à la résistance à mesurer une boîte de résistances. Cette boîte comprend une série de résistances : 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, 100, 200... ohms (fig. 361). Chacune de ces résistances peut être mise hors circuit en introduisant une cheville métallique dans l'alvéole qui y correspond (fig. 362). Par tâtonnement, on arrive à obtenir dans le second circuit l'intensité I obtenue dans le premier circuit. La résistance à mesurer est alors égale à la somme des résistances dont les chevilles sont enlevées.

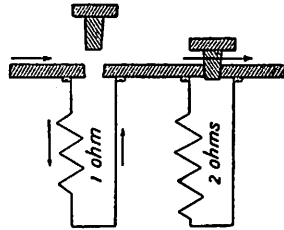


Fig. 362.

291. METHODE DU PONT DE WHEATSTONE (fig. 363).

— Le courant fourni par une pile se partage entre deux branches : l'une de ces branches est constituée d'un fil de maillechort AB fin, homogène, de section constante; l'autre est formée d'une boîte de résistance R et de la résistance x à mesurer. Entre ces deux branches est jeté un pont comprenant un galvanomètre G et un curseur C mobile le long du fil AB. On forme avec la boîte de résistances une résistance R approximativement égale à la résistance x à mesurer; on détermine ensuite, par tâtonnement, la position à donner au

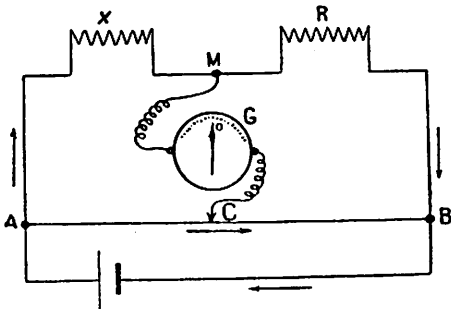


Fig. 363.

curseur sur le fil AB pour qu'il ne passe aucun courant dans le galvanomètre. Le potentiel au point M est, dans ces conditions, égal au potentiel au point C. Donc :

$$V_A - V_M = V_A - V_C \quad \text{et} \quad V_M - V_B = V_C - V_B$$

Si i_1 et i_2 désignent les intensités respectives dans les branches AMB et ACB, si r_1 et r_2 désignent les résistances respectives des portions de fil AC, de longueur l_1 , et BC, de longueur l_2 , il vient par application de la loi d'Ohm :

$$i_1 x = i_2 r_1 \quad \text{et} \quad i_1 R = i_2 r_2.$$

De ces relations, on tire :

$$\frac{x}{r_1} = \frac{R}{r_2}; \quad x = R \cdot \frac{r_1}{r_2}; \quad x = R \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. On mesure à la boussole des tangentes une déviation de 3° pour un courant de 0,001 A. Dresser le graphique qui donne pour cet instrument l'intensité du courant en fonction de l'angle de déviation.

2. Au moyen d'un potentiomètre, on compare la force électromotrice d'une pile sèche à la force électromotrice d'une pile étalon ($E = 1,02$ V). On remarque qu'il ne passe pas de courant dans le galvanomètre lorsque les longueurs du fil de l'appareil sont 70 cm et 48 cm. Déterminer la force électromotrice de la pile sèche. $R : 1,49$ V.

3. On branche en série dans un circuit un galvanomètre et une résistance de 500Ω . On observe que l'aiguille du galvanomètre dévie de 20 divisions pour une intensité de courant de 1 mA. On shunte ensuite le galvanomètre avec la résistance de 500Ω . On observe que l'aiguille dévie de 20 divisions pour une intensité de courant de 5 mA. a) Calculer la résistance du galvanomètre. b) Déterminer l'intensité du courant qui produirait la même déviation de l'aiguille du galvanomètre shunté avec une résistance de 2Ω . $R : a) 2\,000 \Omega; b) 1,001$ A.

LECTURE

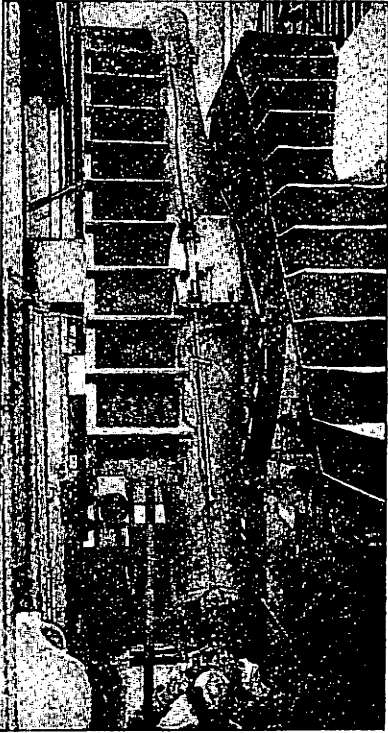
DE L'INFINIMENT GRAND A L'INFINIMENT PETIT

Faut-il s'étonner que l'homme de l'antiquité et du moyen âge qui ne faisait ses observations qu'à l'œil nu considérait la Terre comme un plan immobile, centre d'un univers ?

Ce n'est qu'au début du XVII^e siècle que le télescope lui permet de scruter l'infiniment grand et que le microscope l'amène à expliquer le macroscopique par l'infiniment petit.

Aux environs de 1610, Galilée dirige vers le ciel une lunette grossissant trente fois : « Nous ne pouvons qu'imaginer sa joie et son émotion à voir ce que nul regard n'avait encore observé; à trouver la Lune, que, sur la foi d'Aristote, on croyait un globe parfaitement poli, couvert de montagnes

et de vallées dont l'éclairage solaire accentuait les reliefs; à découvrir des étoiles invisibles; à voir la tache uniforme de la Voie Lactée se résoudre en une poussière d'étoiles; à reconnaître, autour de la planète Jupiter, quatre petites lunes qui gravitaient doucement; à discerner enfin les taches du Soleil » (1).



Document Endeavour.

Fig. 364. — Télescope.

il permet de voir la flamme d'une bougie à 18 800 km. Le télescope de Palomar, qui pèse 450 tonnes, possède un miroir de 5 m de diamètre : braqué vers la Terre, il permettrait d'observer, en l'absence de toute autre source lumineuse, les vers luisants des Champs Elysées à Paris.

La fabrication du miroir du télescope de Mont-Wilson a exigé plusieurs années. La masse de verre coulée dans un moule spécial fut refroidie en dix mois afin d'éviter l'apparition de stries et fut ensuite polie par quatre-vingts ouvriers munis d'appareils spéciaux dans une chambre à air conditionné à l'abri de toute poussière. On y découpa un disque à face convexe parabolique. Sur cette face parabolique, on déposa une épaisse couche d'aluminium. On disposa le miroir à l'extrémité d'un tube métallique de 16,87 m

De nos jours, les astronomes utilisant non la lunette mais le télescope (fig. 364) parviennent à mesurer les distances séparant les corps célestes qu'ils expriment, eu égard à leur énormité, en années-lumière, distances parcourues par la lumière en un an (9 460 000 000 000 km).

Les télescopes les plus puissants sont ceux du Mont-Wilson et de Palomar (U.S.A.) : le télescope du Mont-Wilson qui a repoussé l'horizon à cinq cent millions d'années-lumière décèle cent millions de galaxies (2); le télescope de Palomar qui a refoulé l'horizon à un milliard d'années-lumière révèle un milliard de galaxies. Le télescope électronique, dont on installe un spécimen à Saint-Michel de Provins, promet une puissance de pénétration qui rendra, sans aucun doute, archaïques les deux télescopes du Mont-Wilson et de Palomar.

Le télescope du Mont-Wilson, qui pèse 96 tonnes, possède un miroir de 2,50 m de diamètre qui, seul, pèse 4500 kg :

(1) Pierre Rousseau, « Histoire de la Science », pp. 197 et 198. A. Fayard, éditeur.

(2) On appelle :
étoile : astre produisant lumière et chaleur. Le nombre d'étoiles vues à l'œil nu est d'environ 3000. L'étoile la plus proche de la terre est située à quelques quatre années-lumière;
galaxie : système d'étoiles. La galaxie dont fait partie la terre est un disque renflé au centre dont le diamètre est évalué à 80 000 années-lumière et comportant des étoiles dont le nombre est estimé à 200 000 000 000.

de longueur et de 6,70 m de diamètre dont le poids est de 1,5 tonne. On monta le tube sur une culasse, elle-même, de dimensions gigantesques.

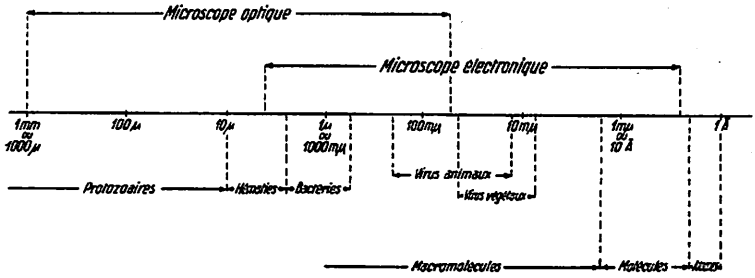


Fig. 365.

Les observations faites avec ces puissants yeux ouverts sur le Cosmos ont révolutionné notre conception de l'Univers. Au système de Ptolémée (astro-

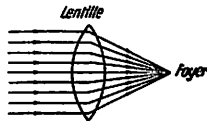


Fig. 366.

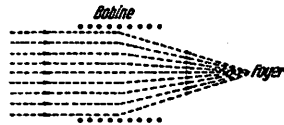


Fig. 367.

nome égyptien : II^e siècle ap. J.-C.) s'est substitué le système de Copernic (astronome polonais : 1473-1543) : la Terre n'est qu'une planète tournant

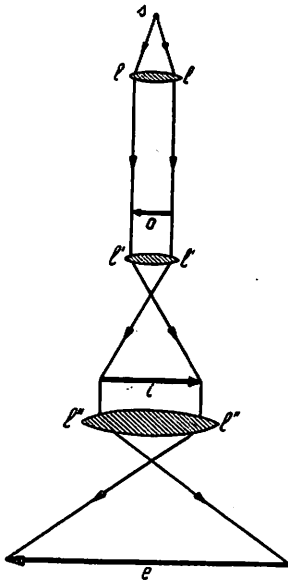


Fig. 368.

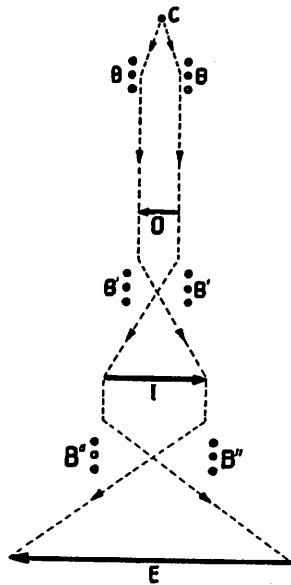
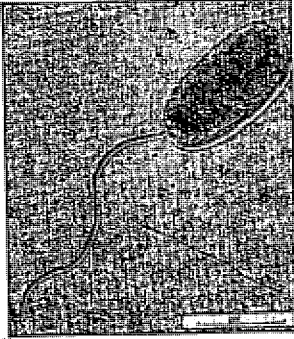


Fig. 369.

inlassablement comme d'autres planètes autour du Soleil. La constatation que les galaxies s'écartent les unes des autres a suggéré au chanoine Lemaitre la théorie de l'Univers en expansion.

L'exploration de l'infiniment petit n'est pas moins passionnante que l'exploration de l'infiniment grand.



Extrait du Tome II de
l'Encyclopédie française
« La Physique ».

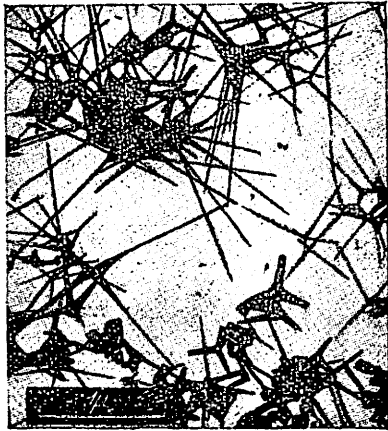
Fig. 370. — Bacille vu au microscope électronique.

L'usage des bésicles, verres grossissants, date du moyen âge (1350). Né au début du XVII^e siècle, le microscope va, de perfectionnement en perfectionnement, reculer les limites observables de l'infiniment petit.

L'œil normal, observant un objet placé à la distance minimum de vision distincte (20 cm), sépare deux points distants de 50μ (0,050 mm). Le microscope le plus puissant ramène cette distance à $0,25 \mu$. Cette limite de séparation ne peut être dépassée pour des raisons inhérentes à la nature de la lumière blanche : à un grossissement plus fort, les taches de diffraction qui apparaissent autour de chaque point, rendent l'image floue. Cette limite de séparation peut cependant être dépassée par d'autres moyens : la microphotographie en ultra-violet et le microscope électronique.

Dans le premier procédé, on photographie l'image donnée par le microscope de l'objet éclairé en lumière ultra-violette (longueur d'onde plus petite) : on sépare ainsi deux points distants de $0,01 \mu$.

Dans le microscope électronique, on utilise les faisceaux d'électrons (fig. 366 et 367). Le microscope électronique comporte une source d'électrons C comme le microscope optique comporte une source de lumière s (fig. 368 et 369). Les électrons sont concentrés par la bobine B parcourue par un courant électrique pour être projetés sur l'objet O comme la lumière est concentrée par la lentille l pour être projetée sur l'objet O. De l'objet O, le flux électronique fournit, grâce à la bobine B', une image agrandie I comme l'objectif l' donne de l'objet o une image agrandie i. De l'image I, le flux électronique fournit, grâce à la bobine B'', une image définitive E sur une pellicule photographique comme l'oculaire l'' donne de l'image i une image définitive e sur une pellicule photographique.



Extrait du Tome II de l'Encyclopédie française « La Physique ».

Fig. 371. — Cristaux d'oxyde de zinc vus au microscope électronique.

L'optique électronique n'est pas encore aussi perfectionnée que l'optique lumineuse : elle permet toutefois de photographier des virus, des bacilles (fig. 370), des grosses molécules, des cristaux (fig. 371) ... Alors que le grossissement maximum des microscopes optiques est d'environ 2400, le grossissement des microscopes électroniques atteint couramment 50 000 et peut même dépasser 200 000. Quand on pourra se servir de protons à la place d'électrons, il atteindra vraisemblablement 1 000 000.

LIVRE VII.

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES.

CHAPITRE I.

GÉNÉRALITÉS SUR LES MOUVEMENTS PÉRIODIQUES.

§ 1. MOUVEMENTS PÉRIODIQUES.

Le mouvement périodique est constitué d'une succession de mouvements identiques entre eux que nous appellerons **cycles**.
Exemples : la rotation de la Terre, la rotation d'un disque, les déplacements du piston dans le cylindre de la machine à vapeur, les battements du cœur, la respiration, la marche... L'intervalle de temps nécessaire pour accomplir un cycle complet du mouvement est la **période** T du mouvement; le nombre de cycles effectués en une seconde est la **fréquence** ν du mouvement. Il découle de ces définitions que

$$\nu = \frac{1}{T}$$

La fréquence s'exprime en cycles par seconde ou hertz.

1. MOUVEMENT CIRCULAIRE UNIFORME.

292. VITESSE. — Le mouvement d'un mobile est circulaire uniforme lorsque le mobile se déplaçant le long d'une circonférence parcourt des arcs de cercle proportionnels aux temps employés à les parcourir.

Vitesse linéaire. — Le rapport constant des arcs de cercle s parcourus aux temps t employés à les parcourir est le module de la vitesse ou **vitesse linéaire**.

$$v = \frac{s}{t} = \text{Cte}$$

La vitesse linéaire v d'un mobile parcourant une circonférence de rayon r en un temps T est donnée par les relations :

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad \text{ou} \quad v = 2\pi r\nu.$$

Si le module de la vitesse est constant, la direction de la vitesse, tangente en tout point à la circonférence, change à tout instant.

Vitesse angulaire. — Puisque la vitesse linéaire est constante, la vitesse angulaire du mobile, angle au centre ω décrit en l'unité de temps par le mobile, est constante : elle vaut

$$\omega = \frac{v}{r}; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \omega = 2\pi\nu.$$

293. ACCÉLÉRATION CENTRIPÈTE. — Soient \vec{v}_A la vitesse du mobile lors de son passage au point A à l'instant t et \vec{v}_B la vitesse du mobile lors de son passage au point B à l'instant $t + \Delta t$ (fig. 372). En un point quelconque O' , menons deux vecteurs \vec{v}'_A et \vec{v}'_B égaux et parallèles aux vecteurs \vec{v}_A et \vec{v}_B . La variation de vitesse produite pendant l'intervalle de temps Δt est $\Delta\vec{v}'$. L'accélération moyenne a_m du mobile est (Tome I, n° 36) :

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta\vec{v}'}{\Delta t}.$$

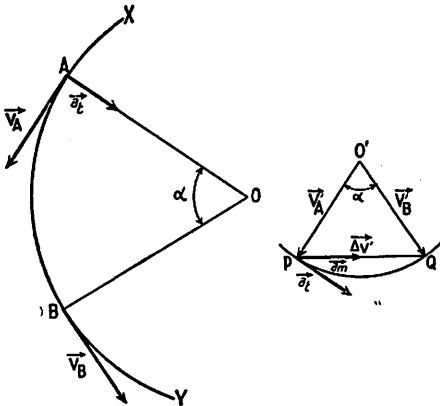


Fig. 372.

L'accélération a du mobile au point A, qui est représentée par le vecteur tangent en P à l'arc de cercle PQ et perpendiculaire au vecteur vitesse \vec{v}'_A , est la limite de l'accélération moyenne a_m lorsque l'intervalle de temps Δt tend vers zéro (Tome I, n° 36) :

$$\vec{a} = \limite \left(\frac{\Delta\vec{v}'}{\Delta t} \right) \quad \Delta t \rightarrow 0$$

Or, la corde PQ pouvant être confondue avec l'arc PQ quand l'intervalle de temps Δt devient de plus en plus petit, la variation de vitesse $\overrightarrow{\Delta v'}$ vaut :

$$\overrightarrow{\Delta v'} = \alpha v \quad \text{ou} \quad \overrightarrow{\Delta v'} = -\frac{v^2}{r} \Delta t$$

puisque $\alpha = \omega \Delta t$ et $\omega = v/r$.

L'accélération \overrightarrow{a} à laquelle est soumis le mobile vaut :

$$a = \frac{v^2}{r} \quad \text{ou} \quad a = \omega^2 r.$$

Un mobile animé d'un mouvement circulaire uniforme est soumis à une accélération centripète.

294. FORCE CENTRIPÈTE. — En vertu de la seconde loi de Newton, $F = Ma$ (Tome I, n° 54), le mobile doué d'une accélération centripète est soumis à une force centripète.

$$F_{cp} = M\omega^2 r$$

La force centripète s'applique au mobile : elle est indispensable au maintien du mobile sur la circonférence qu'il décrit.

Exemples : 1°) Lorsqu'on fait tourner autour de la main une pierre attachée à une corde, la main, par l'intermédiaire de la corde, exerce constamment sur la pierre une force dirigée vers le centre de rotation : c'est la force centripète (fig. 373).

2°) A un virage, le cycliste s'incline légèrement. Le cycliste exerce sur le sol une poussée oblique F_a ; le sol réagit sur le cycliste avec une force égale et opposée F_r (fig. 374). La force F_r peut être décomposée en une force P' et une force F_{cp} . Tandis que la force P' s'oppose

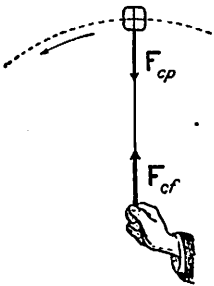


Fig. 373.

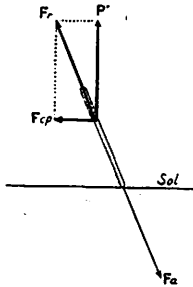


Fig. 374.

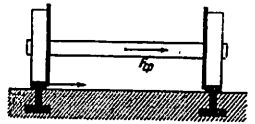


Fig. 375.

à la chute du cycliste, la force F_{cp} est la force centripète nécessaire à la rotation du cycliste.

3^o) Dans une courbe, le rail extérieur exerce sur le tram une force centripète (fig. 375).

4^o) La Terre tourne autour du Soleil : le Soleil exerce sur la Terre une force centripète (force d'attraction newtonienne du Soleil sur la Terre).

295. FORCE CENTRIFUGE. — En vertu de la troisième loi de Newton, égalité de l'action et de la réaction (Tome I, n^o 57), le mobile, soumis à la force centripète, exerce une force égale et opposée : la **force centrifuge**. La **force centrifuge** est tout aussi réelle que la force centripète : elle n'est toutefois **pas appliquée au mobile**. Dans les exemples précédents, la force centrifuge :

1^o) exercée par la pierre s'applique, par l'intermédiaire de la corde, à la main (l'opérateur perçoit nettement que la pierre tend à arracher la main du centre de la circonférence);

2^o) exercée par le cycliste s'applique au sol (la boue du sol est projetée suivant le rayon de la courbe décrite par le cycliste);

3^o) exercée par le tram est appliquée au rail extérieur;

4^o) exercée par la Terre est appliquée au Soleil (force d'attraction newtonienne de la Terre sur le Soleil).

296. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DE LA FORMULE $M \omega^2 r$. — 1^o) La force centripète (ou centrifuge) est proportionnelle à la masse du corps et au rayon de la circonférence décrite par le corps.

Deux sphères de masses différentes M et M' reliées entre elles par un cordon peuvent glisser à frottement doux sur une tringle horizontale ab (fig. 376). Cette tringle peut tourner autour d'un axe vertical xx' passant par son milieu. Plaçons les deux sphères sur la tringle, le cordon de liaison étant tendu, de telle façon que les distances de leurs centres à l'axe de rotation soient en raison inverse de leurs masses c'est-à-dire que nous ayons

$$Mr = M'r'$$

Faisons tourner l'appareil : les sphères, animées de vitesses angulaires égales, restent en équilibre sur la tringle. Les forces centrifuges appliquées au cordon de liaison sont donc proportionnelles au produit de la masse du mobile par le rayon de la circonférence décrite.

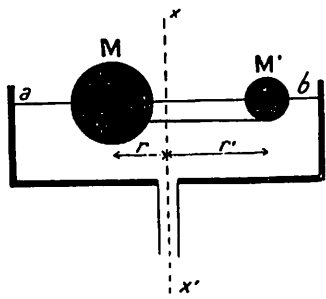


Fig. 376.

2^o) La force centripète (ou centrifuge) est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire.

Fixons sur l'axe A d'une poulie à double gorge L un étrier supportant une tringle horizontale ab sur laquelle est située à une distance d de l'axe A une sphère S de masse M reliée par un cordon passant sur une poulie de renvoi à un poids P (fig. 377). Fixons sur l'axe A' d'une poulie L' , dont le diamètre est moitié de celui de la poulie L , un étrier supportant une tringle horizontale $a'b'$ sur laquelle est située à la distance d de l'axe A' une sphère

S' de masse M reliée par un cordon passant sur une poulie de renvoi à un poids $4P$. Relions par des courroies sans fin la poulie L à la poulie L' et la poulie L à un volant V . Faisons tourner les appareils. Nous constatons que

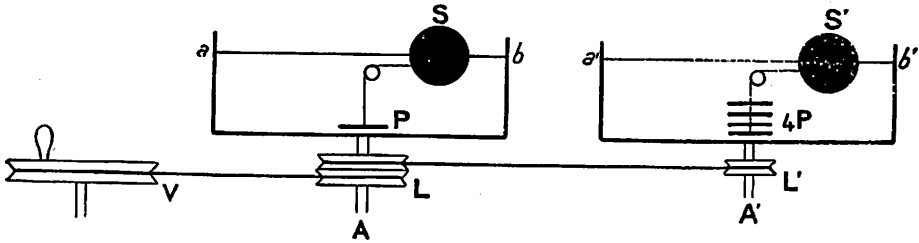


Fig. 377.

les sphères commencent simultanément à s'éloigner de leurs axes de rotation respectifs. A l'instant même où les sphères commencent à s'éloigner, les forces centrifuges appliquées aux cordons et, par conséquent, les forces centripètes appliquées aux sphères S' et S valent respectivement $4P$ et P . Or, la vitesse de rotation de la sphère S' est double de la vitesse de rotation de la sphère S . Donc, la force centripète est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire.

297. EFFETS CENTRIFUGES. — Animons une pierre maintenue par une corde d'un mouvement circulaire de très grande vitesse: la corde se rompt. A l'instant même de la rupture, la force centripète et la force centrifuge disparaissent simultanément et la pierre, obéissant au principe d'inertie, parcourt la tangente à la circonférence au point de rupture avec la vitesse qui l'animait à l'instant de la rupture. Nous en concluons que, dès qu'un mobile n'est plus assujéti à suivre sa trajectoire circulaire, force centrifuge et force centripète disparaissent. Nous observons alors des effets d'inertie appelés **effets centrifuges**.

Exemples : Rupture des volants et des meules; mouvements des voyageurs aux courbes de la voie; projection de la boue par les roues des véhicules; lancement de la pierre par la fronde.

298. APPLICATIONS. — Parmi les applications signalons : l'inclinaison des voies de chemin de fer, des pistes des vélodromes, des routes dans les courbes⁽¹⁾; les turbines employées en sucrerie pour séparer le sucre de la mélasse, en laiterie pour séparer la crème du petit lait grâce à la différence des masses spécifiques; lesessoreuses utilisées pour le séchage du linge; les régulateurs de Watt réglant l'arrivée de la vapeur dans le cylindre des machines à vapeur; les appareils centrifuges de laboratoire.

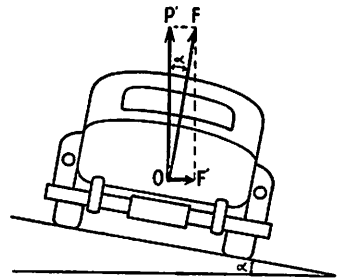


Fig. 378.

(1) A un virage sur une route plane, la force centripète F_{cp} à laquelle doit être soumise une automobile est produite par le frottement f des pneus sur la route (si le frottement f n'atteint pas la force centripète F_{cp} requise, l'automobile dérape). A un virage sur une route relevée, la force F , réaction de la route sur l'automobile, donne une composante F' qui s'additionne au frottement f des pneus sur la route pour constituer la force centripète F_{cp} (fig. 378).

2. MOUVEMENT HARMONIQUE SIMPLE.

299. MOUVEMENT HARMONIQUE SIMPLE. — Définitions. — Considérons un point M qui part au temps 0 de la position A pour décrire d'un mouvement uniforme la circonférence de centre O et de rayon a (fig. 379). Etudions le mouvement du point m , projection du point M sur le diamètre BOB' : quand le point M part de la position A pour décrire la circonférence, le point m part de la position O pour parcourir le segment BOB' . La distance e qui sépare le point m de la position de départ O varie en fonction du temps comme l'indique le tableau suivant :

temps	0	$T/4$	$T/2$	$3T/4$	T	$5T/4$...
angles décrits par le point M	0.	$\pi/2$	π	$3\pi/2$	2π	$5\pi/2$...
distances du point m au point O	0	a	0	$-a$	0	a

Portons en abscisses les temps et en ordonnées les distances du point m au point O , nous obtenons une **sinusoïde** (fig. 380).

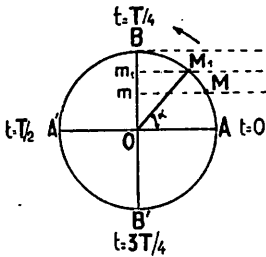


Fig. 379.

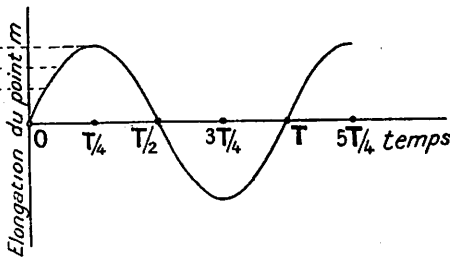


Fig. 380.

La trajectoire décrite par le point m se réduit à un segment de droite : le mouvement périodique dont est animé le point m est un **mouvement vibratoire sinusoïdal** ou un **mouvement oscillatoire sinusoïdal** ou encore un **mouvement harmonique simple**.

Le cycle du mouvement oscillatoire sinusoïdal, qui comporte le trajet OB , BO , OB' et $B'O$, est appelé **oscillation**; la distance e du point oscillant m au point O est connue sous le nom d'**élongation**; la valeur maximum a de l'élongation du point m oscillant est appelée **amplitude**.

***Etude analytique.** — 1^o) **Elongation.** — Après un temps t , le point M , arrivé à la position M_1 , a décrit un angle α . Au temps t , l'élongation e_t du point m est :

$$e_t = Om_1; \quad e_t = a \sin \alpha; \quad e_t = a \sin \omega t$$

et

$$e_t = a \sin \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

L'élongation, qui dépend de l'amplitude et de la période, varie sinusoidalement en fonction du temps.

En remplaçant successivement dans la relation précédente la variable t par les valeurs : $0, T/4, T/2, 3T/4, T, 5T/4...$ nous retrouvons les résultats consignés dans le tableau ci-dessus.

2°) **Vitesse.** — La vitesse V_t du point oscillant m est égale à la composante selon BB' de la vitesse V du mobile M décrivant la circonférence d'un mouvement uniforme (fig. 343).

$$V_t = V \cos \alpha \quad \text{ou} \quad V_t = V \sin (90^\circ - \alpha) \quad (2)$$

La courbe représentative de la variation de la vitesse du point oscillant en fonction du temps est une sinusoïde décalée de 90° par rapport à la sinusoïde représentant la variation de l'élongation du point oscillant en fonction du temps (fig. 382).

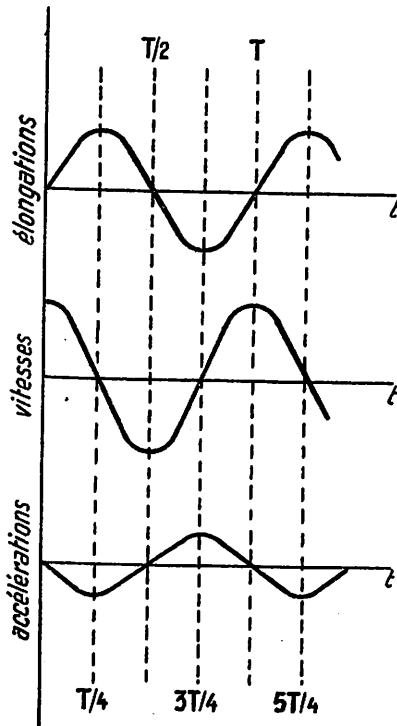


Fig. 382.

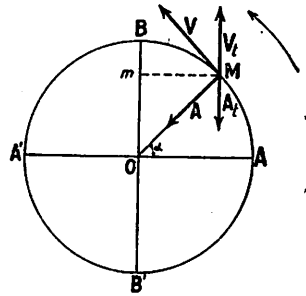


Fig. 381.

3°) **Accélération.** — L'accélération A_t du point oscillant m est égale à la composante selon BB' de l'accélération A du mobile M décrivant la circonférence d'un mouvement uniforme (fig. 381).

$$A_t = - A \cos (90^\circ - \alpha);$$

$$A_t = - A \sin \alpha$$

$$A_t = - \frac{V^2}{a} \sin \alpha \quad (3)$$

La courbe représentative de la variation de l'accélération du point oscillant en fonction du temps est une sinusoïde décalée de 180° par rapport à la sinusoïde représentative de la variation de l'élongation du point oscillant en fonction du temps (fig. 382).

Divisons membre à membre la relation $A_t = -\frac{V^2}{a} \sin \alpha$ par la relation $e_t = a \sin \alpha$, nous obtenons :

$$\frac{A_t}{e_t} = -\frac{V^2}{a^2};$$

$$A_t = -\frac{V^2}{a^2} e_t;$$

$$A_t = k e_t.$$

Dans le mouvement harmonique simple, l'accélération du point oscillant et, par conséquent, la force de rappel agissant sur le mobile sont proportionnelles à l'élongation et réciproquement (fig. 383). Il en est ainsi dans le mouvement exécuté par un corps élastique tel qu'une lame, un diapason, un ressort.

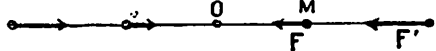


Fig. 383

300. ÉNERGIE D'UN OSCILLATEUR. — Lorsqu'un oscillateur passe par sa position d'équilibre, son énergie potentielle est nulle : $T_p = 0$, son énergie cinétique est maximum : $T_c = mv^2/2$. Or, la vitesse de l'oscillateur de masse m à son passage par sa position d'équilibre est égale à la vitesse du point M tournant d'un mouvement uniforme sur la circonférence de rayon a (fig. 381). Donc,

$$v = \omega a; \quad v = \frac{2\pi a}{T}; \quad v = 2\pi a\nu$$

L'énergie cinétique de l'oscillateur à son passage par sa position d'équilibre et, par conséquent, son énergie totale vaut :

$$T = 2m\pi^2 a^2 \nu^2$$

L'énergie d'un oscillateur est donc proportionnelle au carré de l'amplitude du mouvement.

3. MOUVEMENT PENDULAIRE.

301. MOUVEMENT PENDULAIRE. — **Raisonnement.**

— Considérons un pendule simple éloigné d'un angle α de sa position d'équilibre statique (fig. 384). La force F qui tend à

ramener le pendule de masse M vers sa position d'équilibre statique vaut

$$F = - Mg \sin \alpha \quad (1)$$

si nous convenons de compter positivement le sens de gauche à droite (fig. 346). Or, l'angle α exprimé en radians vaut

$$\alpha = \frac{s_t}{l} \quad (2)$$

si nous désignons par s_t le déplacement (arc de cercle) de la masse oscillante et l la longueur du pendule. L'accélération A_t du pendule à son passage au point considéré est donc

$$A_t = - g \sin \frac{s_t}{l} \quad (3)$$

relation qui s'écrit

$$A_t = - \frac{g}{l} s_t \quad (4)$$

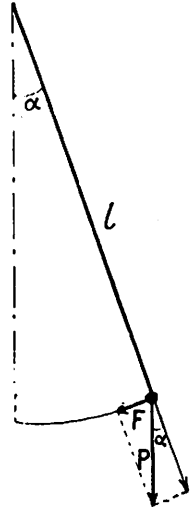


Fig. 384.

pour des oscillations d'amplitude très faible.

L'accélération à laquelle est soumis le pendule étant proportionnelle à l'élongation, le mouvement pendulaire est un mouvement harmonique simple pour des oscillations de très faible amplitude.

Vérification expérimentale. — Un pendule formé d'une masse très

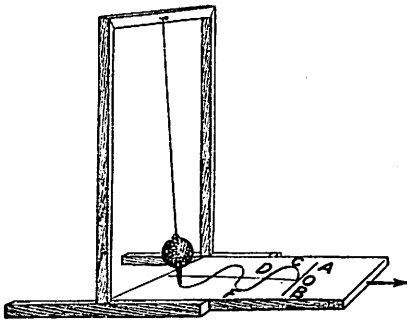


Fig. 385.

lourde porte, à son extrémité, un crayon léger pouvant coulisser librement dans un tube de section légèrement supérieure à la section du crayon. Ce crayon appuie faiblement sur une feuille de papier appliquée sur une planche mobile entre deux glissières (fig. 385). Le plan d'oscillation du pendule est normal à la direction de translation de la planche. Si la planche est immobile, le crayon inscrit la droite AOB. Si la planche glisse d'un mouvement uniforme, nous enregistrons une courbe sinusoïdale OCDF... qui représente

les élongations du pendule en fonction du temps. En inspectant la courbe enregistrée, nous constatons que c'est une sinusoïde.

302. FORMULE DU MOUVEMENT PENDULAIRE. —

En remplaçant, dans la relation précédente, l'accélération A_t à

l'instant t par la valeur $-V^2 e_t / a^2$ de l'accélération dans le mouvement harmonique (n^o 299), nous obtenons successivement :

$$\frac{V^2}{a^2} e_t = \frac{g}{l} s_t \quad \text{et} \quad \frac{V^2}{l^2} = \frac{g}{l}$$

puisque $e_t = s_t$ et $a = l$.

Or, $V = \omega l$ et $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Donc,

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{g}{l}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

La période des oscillations de faible amplitude d'un pendule est directement proportionnelle à la racine carrée de la longueur du pendule et inversement proportionnelle à la racine carrée de l'accélération de la pesanteur. Ces lois ont été établies antérieurement par l'expérience (Tome I, n^o 72).

303. DÉTERMINATION DE L'ACCÉLÉRATION DE LA PESANTEUR.

— Pour déterminer avec précision la valeur de g , on utilise le pendule réversible (fig. 386), tige métallique munie de deux couteaux pouvant constituer des axes de suspension et de masses métalliques déplaçables. Par tâtonnements, on modifie la position des masses métalliques de manière que la période du pendule reste identique quel que soit le couteau servant d'axe de suspension : la distance qui sépare les arêtes des deux couteaux est, dans ce cas,

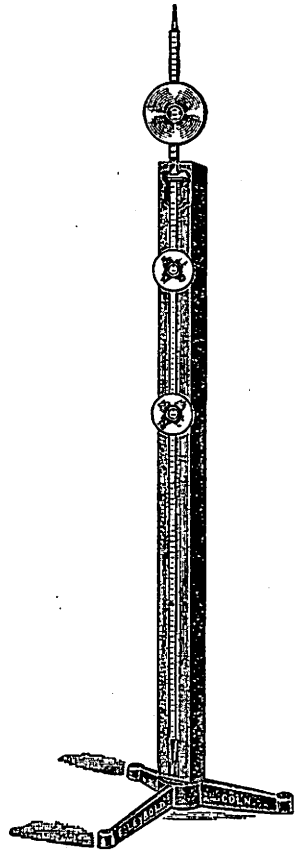


Fig. 386.

égale à la longueur du pendule simple de même période que celle du pendule réversible. Avec toute la précision désirable, on détermine la distance l séparant les arêtes des deux couteaux et la période d'oscillation T du pendule réversible et on calcule la valeur de g par la relation

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

304. AMORTISSEMENT. — Les oscillations successives d'un pendule libre diminuent progressivement d'amplitude : le mouvement s'amortit. L'amortissement est causé par les frottements et par la résistance de l'air. L'amortissement est très rapide si le pendule oscille dans l'eau. Pour maintenir aux oscillations la même amplitude, il faut compenser l'énergie perdue par le pendule par un apport d'énergie (Tome I, n° 72) : dans ce cas, le mouvement est dit **entretenu**.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Les diamètres des roues, de la roue dentée du pédalier et de la roue dentée du pignon arrière d'une bicyclette sont respectivement 80 cm, 18 cm et 6 cm. Quelle est la vitesse du cycliste lorsque le pédalier fait 60 tours par minute ?

SOLUTION. — Nombre de tours ν_1 du pédalier par seconde : $\nu_1 = 60/60 = 1 \text{ tr/s}$.
 Arc s_1 décrit en une seconde par le pédalier : $s_1 = 2\pi r_1 \nu_1 t$; $s_1 = 2\pi \cdot 9.1 = 18\pi$.
 Arc s_1 décrit par le pédalier = arc s_2 décrit par le pignon.
 Arc s_2 décrit en une seconde par le pignon : 18π .
 Nombre de tours ν_2 du pignon : $s_2 = 2\pi r_2 \nu_2 t$; $\nu_2 = s_2/2\pi r_2 t$; $\nu_2 = 18\pi/2\pi \cdot 3 = 3 \text{ tr/s}$.
 Nombre de tours ν_2 du pignon = nombre de tours ν_3 de la roue arrière.
 Arc s_3 décrit en une seconde par la roue arrière : $s_3 = 2\pi r_3 \nu_3 t$; $s_3 = 2.3,1416 \cdot 40.3 = 754 \text{ cm}$.
 Vitesse du cycliste : 754 cm/s ou 27 km/h.

2. Un cycliste dont la masse, machine comprise, est de 75 kg se déplace sur une piste horizontale circulaire de 50 m de rayon à la vitesse de 22,5 km/h. Calculez : a) la force centripète à laquelle doit être soumis le cycliste; b) l'inclinaison du cycliste par rapport à la verticale ($g = 980 \text{ cm/s}^2$).

SOLUTION. — Force centripète à laquelle doit être soumis le cycliste :

$$F_{cp} = \frac{Mv^2}{r}; \quad F_{cp} = \frac{75 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{2\,250\,000}{3\,600}\right)^2}{5 \cdot 10^3} = 5\,859\,375 \text{ dyn ou } 5,979 \text{ kg'}$$

Inclinaison du cycliste par rapport à la verticale :

$$\begin{aligned} \text{tg } a &= \frac{F}{P}; & \text{tg } a &= \frac{\frac{Mv^2}{r}}{Mg}; & \text{tg } a &= \frac{v^2}{gr}; & \text{tg } a &= \frac{\left(\frac{2\,250\,000}{3\,600}\right)^2}{980 \cdot 5\,000} = 0,0797 \\ & & & & a &= 4^\circ 49' \end{aligned}$$

3. Un oscillateur, dont la masse est de 50 g, exécute 40 oscillations en 2 min. L'amplitude des oscillations, que l'on suppose constante, est égale à 10 cm ; le temps est compté à partir du moment où l'oscillateur passe par sa position d'équilibre. On demande : 1°) l'élongation de l'oscillateur aux temps 1, 2, 3 et 9,75 s; 2°) l'énergie totale de l'oscillateur.

SOLUTION. — Période de l'oscillateur : $T = \frac{120}{40} = 3 \text{ s}$.

1°) Elongations de l'oscillateur : $e_t = a \sin \frac{2\pi t}{T}$.

au temps 1 : $e_1 = 10 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 1}{3}$; $e_1 = 10 \cdot \sin 120^\circ = 8,66 \text{ cm}$.

au temps 2 : $e_2 = 10 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 2}{3}$; $e_2 = 10 \cdot \sin 240^\circ = -8,66 \text{ cm}$.

au temps 3 : $e_3 = 10 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 3}{3}$; $e_3 = 10 \cdot \sin 360^\circ = 0 \text{ cm}$.

au temps 9,75 : $e_{9,75} = 10 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot 9,75}{3}$; $e_{9,75} = 10 \cdot \sin 1170^\circ = 10 \text{ cm}$.

2°) Energie totale de l'oscillateur

$$T = 2mn^2a^2v^2; \quad T = \frac{2 \cdot 50 \cdot 3,14^2 \cdot 10^2}{3^2} = 1,1 \cdot 10^4 \text{ ergs}$$

4. Un pendule réversible dont la distance entre les couteaux est 1,431 m. exécute, en un endroit déterminé, 25 oscillations complètes par minute quel que soit le couteau de suspension. Calculer la valeur de l'accélération de la pesanteur en ce lieu.

SOLUTION. — L'accélération de la pesanteur en ce lieu est :

$$g = \frac{4\pi^2l}{T^2}; \quad g = \frac{4 \cdot 3,1416^2 \cdot 143,1}{\left(\frac{60}{25}\right)^2} = 980,8 \text{ cm/s}^2.$$

§ 2. PROPAGATION DU MOUVEMENT VIBRATOIRE.

305. PROPAGATION D'UNE DÉFORMATION.

Expériences. — 1. Abaissons et relevons l'extrémité libre A d'un long tube de caoutchouc fixé par son extrémité B : la déformation produite se propage tout le long du tube avec une vitesse constante, quelle que soit la grandeur de la déformation (fig. 387).

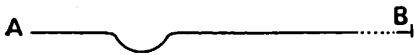


Fig. 387.

2. Déplaçons brusquement, de façon à en rapprocher les premières spires, l'extrémité A d'un très long ressort à boudin attaché au mur par l'autre extrémité (fig. 388). La condensation produite se propage le long du ressort avec une vitesse constante. Ecartons ensuite les spires au lieu de les rapprocher, la dilatation produite se propage le long du ressort avec la même vitesse (fig. 388).



Fig. 388.

Conclusion. — Toute déformation, qu'elle soit perpendiculaire à la direction de propagation (déformation transversale) ou qu'elle soit parallèle à la direction de propagation (déformation longitudinale), produite en un point d'un milieu élastique se propage en se transmettant de proche en proche à tous les points du milieu.

1. VIBRATIONS TRANSVERSALES.

306. PROPAGATION D'UN MOUVEMENT VIBRATOIRE DANS UNE DIRECTION. — LONGUEUR D'ONDE.

Expérience. — Communiquons à l'extrémité libre A d'un long tube de caoutchouc un mouvement vibratoire comprenant plusieurs oscillations : les déformations successives du point oscillant se propagent tout le long du tube sous forme d'un « train d'ondes »



Fig. 389.

qui se déplace avec une vitesse constante (fig. 389).

Longueur d'onde. — Considérons la direction AX d'un milieu élastique et supposons le point A animé d'un mouvement vibratoire rectiligne, perpendiculaire à la direction AX, d'amplitude a et de période T. Ce mouvement se propage le long de la droite AX avec une vitesse V. Chaque particule de la droite AX répétera le mouvement du point A avec un retard proportionnel à la distance qui le sépare de la source A. Si nous prenons comme origine des temps l'instant où le point A commence son mouvement (fig. 390 a), au temps T le mouvement vibratoire atteint le point A₁ distant du point A de VT (fig. 390 b); au temps 2T le mouvement vibratoire

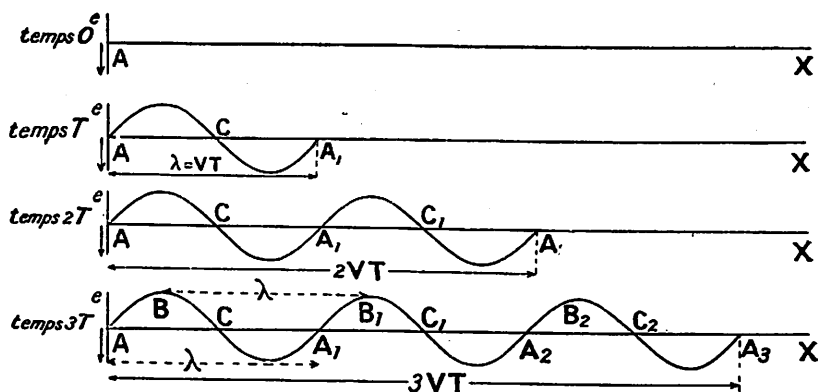


Fig. 390.

atteint le point A₂ distant du point A de 2VT (fig. 390 c); au temps 3T le mouvement vibratoire atteint le point A₃ distant du point A de 3VT (fig. 390 d)...

L'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant une période est appelé longueur d'onde.

Si nous désignons la longueur d'onde par la lettre λ , nous avons donc :

$$\boxed{\lambda = VT} \quad \text{ou} \quad \boxed{\lambda = \frac{V}{\nu}}$$

***Étude analytique.** — Si nous prenons comme origine des temps l'instant où le point A commence une vibration, l'élongation de la source A au temps t est (n° 299) :

$$e_A = a \sin \frac{2\pi t}{T}$$

Un point quelconque M, qui se trouve à une distance d du point A, exécute le mouvement du point A avec un retard t' . Ce retard t' est égal à d/V . L'élongation du point M au temps t est donc égale à

l'élongation qu'avait le point A au temps $(t-t')$; elle vaut (en négligeant l'amortissement) :

$$e_M = a \sin \frac{2\pi}{T} (t - t');$$

$$e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{t'}{T} \right); \quad e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{vT} \right),$$

$$e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$$

Cette relation explique les faits observés :

a) Les élongations successives d'un point quelconque M (à une distance d déterminée) en fonction du temps sont représentées par

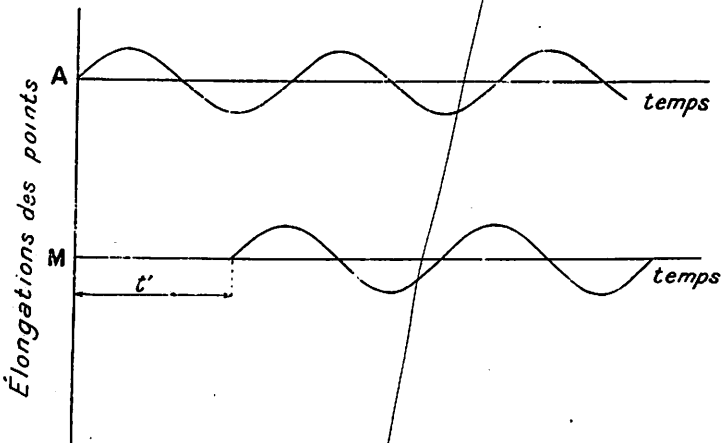


Fig. 391.

une sinusoïde. Cependant la sinusoïde représentant les élongations du point M commence avec un retard t' qui augmente avec la distance d du point considéré au point origine A (fig. 391).

b) Les positions simultanées (à un instant t déterminé) des divers points de la direction de propagation dépendent de la distance qui sépare ces points du point origine. Les points de la droite AX à un moment déterminé s'échelonnent sur une sinusoïde (fig. 390).

307. CONCORDANCE ET OPPOSITION DE PHASE. —

Remarquons qu'au temps $3T$ le point A_3 commence sa première vibration, le point A_2 sa deuxième vibration, le point A_1 sa troisième vibration, le point A sa quatrième vibration (fig. 390). Les points A, A_1 , A_2 , A_3 ... A_k distants du point A de $0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda$... $2k\lambda/2$ (k étant un nombre entier quelconque) ont donc, à tout instant, des élongations égales : ces points sont dits en **concordance de phase**.

Les points C, C₁, C₂, C₃... C_k distants du point A de $\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$, $7\lambda/2$... $(2k + 1) \lambda/2$ ont aussi, à tout instant, des élongations égales aux élongations des points A, A₁, A₂, A₃... A_k mais ces élongations sont de sens contraires : les points C, C₁, C₂, C₃... C_k sont en **opposition de phase** avec les points A, A₁, A₂, A₃... A_k.

Il résulte de ce qui précède que la longueur d'onde est la distance qui, sur la direction de propagation, sépare deux points successifs au même état vibratoire :

$$AA_1 = A_1A_2 = \dots = CC_1 = C_1C_2 \dots = BB_1 = B_1B_2 = \dots = \lambda.$$

***Étude analytique.** — L'équation de vibration d'un point quelconque $e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$ nous conduit aux mêmes condi-

tions de concordance ou de discordance de phase. Pour les points en concordance de phase avec le point origine, le facteur $\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$ doit être égal au facteur $\sin 2\pi \frac{t}{T}$; ce qui implique :

$$2\pi \frac{d}{\lambda} = 2k\pi \quad \text{ou} \quad d = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Pour les points en discordance de phase avec le point origine, le facteur $\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$ doit être égal mais de signe contraire au

facteur $\sin 2\pi \frac{t}{T}$; ce qui implique :

$$2\pi \frac{d}{\lambda} = (2k + 1)\pi \quad \text{ou} \quad d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

308. PROPAGATION DANS UN MILIEU A DEUX DIMENSIONS.

— Une pierre tombant dans une eau tranquille produit au point de chute une déformation. A cause de la tension superficielle qui nous permet d'assimiler la surface de l'eau à une membrane élastique tendue, le point de chute est le siège d'un mouvement vibratoire qui se propage dans tous les sens à la surface du liquide sous forme d'ondes (fig. 392). C'est le mouvement qui se propage et non l'eau qui se déplace, car des bouchons flottant sur l'eau montent et descendent sur place sans subir la moindre transla-

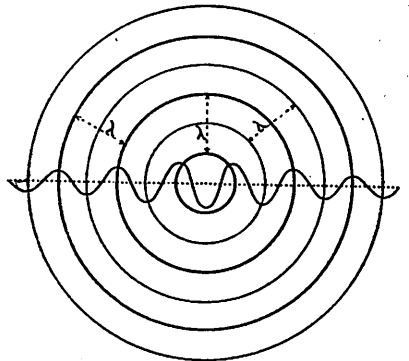


Fig. 392.

tion. Ce que nous avons dit et démontré au sujet de la propagation dans une direction peut être répété pour toutes les directions de la surface du liquide issues du point de chute. Le front de l'onde qui se propage affecte la forme d'une circonférence. La longueur d'onde est la distance qui sépare, dans le train d'ondes annulaires, deux creux successifs ou deux crêtes successives.

309. PROPAGATION DANS UN MILIEU A TROIS DIMENSIONS. — Si un mouvement vibratoire se produit dans un milieu homogène et isotrope, la propagation se fait avec la même vitesse dans toutes les directions. Le front de l'onde qui se propage affecte la forme sphérique.

2. VIBRATIONS LONGITUDINALES.

310. CONDENSATIONS ET DILATATIONS SUCCESSIVES DU MILIEU ÉLASTIQUE PROPAGATEUR.

Expérience. — Produisons une série de compressions et de dilatations successives à une extrémité d'un long ressort à boudin. Nous observons que

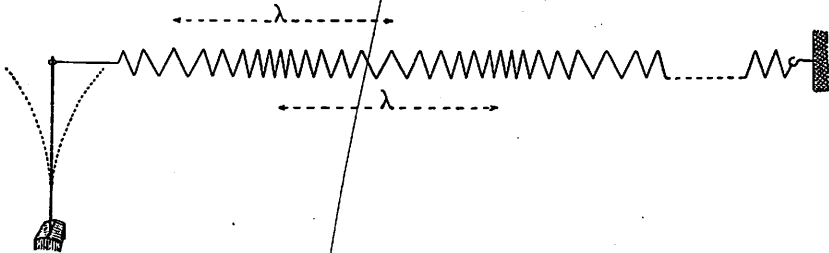


Fig. 393.

des ondes, formées d'une demi-onde comprimée et d'une demi-onde dilatée, parcourent le ressort (fig. 393).

Longueur d'onde. — La longueur d'onde est, comme dans les ondes transversales, l'espace parcouru par le mouvement vibratoire pendant une période ou encore la distance séparant deux points successifs au même état vibratoire.

Application aux particules d'un milieu élastique. — Considérons une file AX de tranches de molécules équidistantes et au repos (fig. 394 a). Si la première tranche de la file exécute un mouvement vibratoire dans la direction AX, le mouvement vibratoire se transmet à toutes les tranches avec un retard qui croît en fonction de la distance à la tranche origine A. Il en résulte que les tranches de la file AX ne conservent plus l'équidistance : des compressions où les tranches sont plus rapprochées alternent avec des dilatations où

les tranches sont plus écartées (fig. 394 *b*). Les compressions et les dilatations progressent avec la même vitesse le long de la direction AX (fig. 394 *c*).

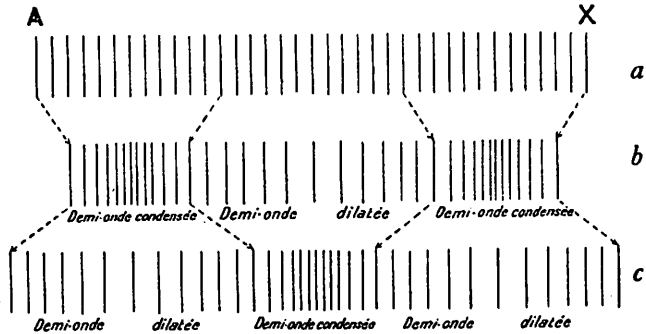


Fig. 394.

Dans les gaz soumis à une telle propagation, il y a des surpressions et des dépressions. Chaque tranche du gaz est donc soumise à des pressions variant alternativement autour d'une pression moyenne.

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — On jette une pierre dans une eau tranquille ; le mouvement ondulatoire qui prend naissance parcourt 6 m en 20 s. 1°) Sachant que la distance qui sépare deux crêtes successives est de 40 cm, calculer la fréquence ν du mouvement vibratoire. 2°) Ecrire l'équation de vibration d'un point M situé à 1,80 m du point de chute de la pierre.

SOLUTION. — 1°) Vitesse de propagation : $V = \frac{600}{20} = 30 \text{ cm/s.}$

Fréquence du mouvement vibratoire : $\nu = \frac{V}{\lambda}$; $\nu = \frac{30}{40} = \frac{3}{4}$.

2°) L'équation de vibration du point M, en prenant comme origine des temps l'instant où le point de chute passe par sa position d'équilibre, est :

$$e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{4/3} - \frac{180}{40} \right) ; \quad e_M = a \sin \left(\frac{3}{2} \pi t - 9\pi \right)$$

Le point M est en discordance de phase avec le point origine.

§ 3. COMPOSITION DES MOUVEMENTS VIBRATOIRES.

311. PRINCIPE DE LA SUPERPOSITION DES PETITS MOUVEMENTS. — Si un point est soumis simultanément à deux mouvements vibratoires, l'élongation de ce point à un instant donné est la résultante géométrique des élongations qu'aurait produites à l'instant considéré chacun des mouvements vibratoires.

Exemple : Un point M aurait au temps t l'élongation MA si le premier mouvement vibratoire agissait seul (fig. 395), l'élongation MB si le second mouvement vibratoire agissait seul : l'élongation

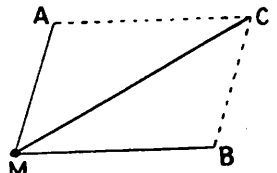


Fig. 395.

du point M sera MC lorsque les deux mouvements vibratoires agiront simultanément.

312. COMPOSITION DE DEUX MOUVEMENTS VIBRATOIRES DE MÊME PÉRIODE. — LES ÉLONGATIONS ONT LA MÊME DIRECTION. — Le point M est soumis simultanément à deux mouvements vibratoires de même période et de même direction.

1^o) **Les mouvements sont en phase.** — Le point M, soumis uniquement au premier mouvement, exécuterait des vibrations suivant le segment AMA' :

ses élongations en fonction du temps seraient représentées par la courbe 1 (fig. 396). Le point M, soumis uniquement au second mouvement, exécuterait des vibrations suivant le segment BMB' : ses élongations en fonction du temps seraient représentées par la courbe 2. Puisque les deux mouvements sont en phase, l'élongation du point M est égale à la somme des deux élongations

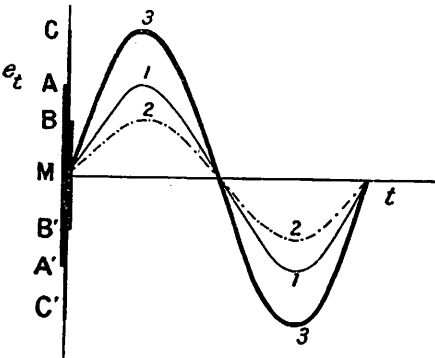


Fig. 396.

individuelles : le point M vibre donc suivant le segment CMC' ; ses élongations en fonction du temps sont représentées par la courbe 3.

2^o) **Les mouvements sont en opposition de phase.** — Les élongations du point M (courbe 1, fig. 397) le long du segment AMA' (1^{er} mouvement) sont, à tout instant, opposées aux élongations du point M (courbe 2, fig. 397) le long du segment BMB' (2^e mouvement). Il en résulte que le point M est animé d'un mouvement vibratoire dont l'amplitude est égale à la différence des amplitudes des mouvements composants. Le point M vibre suivant le segment CMC' ; ses élongations en fonction du temps sont représentées par la courbe 3 (fig. 397). On dit qu'il y a **interférence** des deux mouvements vibratoires.

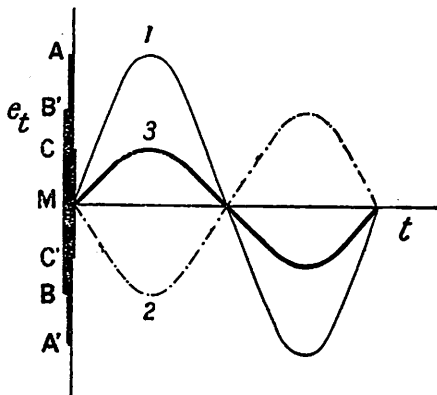


Fig. 397.

En particulier, si les deux mouvements composants ont même amplitude, les deux mouvements se détruisent mutuellement et produisent le repos.

3^o) **Les mouvements sont décalés d'une façon quelconque.** — Le mouvement résultant est un mouvement sinusoïdal, mais l'amplitude de ce mouvement dépend du décalage des mouvements composants (fig. 398).

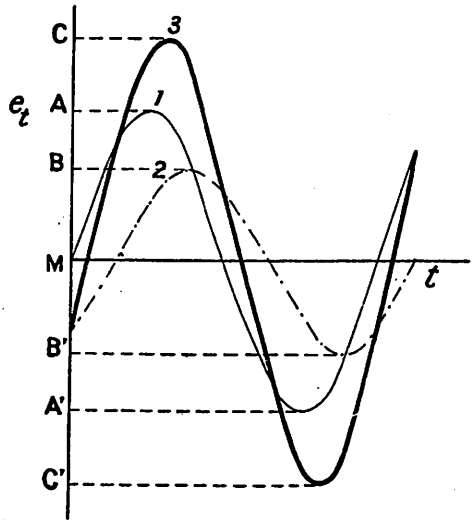


Fig. 398.

313. COMPOSITION DE DEUX MOUVEMENTS VIBRATOIRES DE PÉRIODES PEU DIFFÉRENTES. —

La composition graphique montre que les deux mouvements s'ajoutent et se détruisent périodiquement (fig. 399). Le mouvement résultant est caractérisé par des alternatives d'augmentation et de diminution de l'amplitude. Ce mouvement constitue un battement. La fréquence ν du battement c'est-à-dire la fréquence

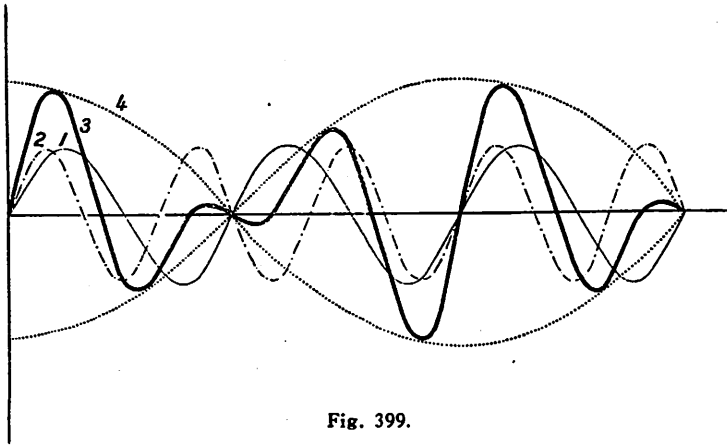


Fig. 399.

de ces variations périodiques de l'amplitude est liée aux fréquences ν_1 et ν_2 des mouvements composants par la relation :

$$\nu = \nu_1 - \nu_2$$

§ 4. INTERFÉRENCES.

314. INTERFÉRENCES. — Deux points S et S' animés de mouvements vibratoires identiques émettent des ondes sinusoidales qui se propagent dans le plan des sources suivant des circonférences concentriques de centres S et S' (fig. 400) Nous supposons que les

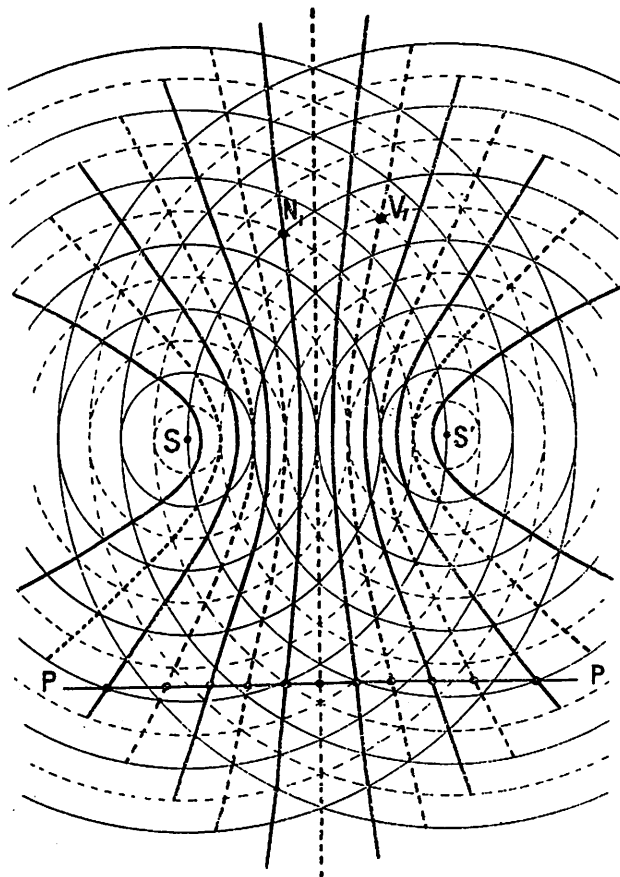


Fig. 400.

sources vibrent en concordance de phase. Les points du plan situés à des distances $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, 2k\lambda/2$ des sources sont en concordance de phase avec ces sources (n° 307). Ces points se trouvent sur des circonférences que nous figurons en traits continus. Les points situés sur ces circonférences sont tous en concordance de phase entre eux. Par contre, les points du plan situés à des distances $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots, (2k + 1)\lambda/2$ des sources sont en opposition de phase avec ces sources (n° 307). Ces points se trouvent sur des circonférences que nous figurons en traits discontinus. Les points situés sur

ces circonférences sont tous en concordance de phase entre eux mais en opposition de phase avec les points situés sur les circonférences en traits continus. Il en résulte :

1^o) Les points d'intersection des circonférences en traits discontinus et les points d'intersection des circonférences en traits continus sont soumis à deux mouvements vibratoires en concordance de phase : ces points sont animés d'un mouvement d'amplitude maximum (n^o 312, 1^o). Tous les points animés d'un mouvement d'amplitude maximum constituent des **ventres de vibration**.

2^o) Les points d'intersection des circonférences en traits continus avec les circonférences en traits discontinus sont soumis à deux mouvements vibratoires en opposition de phase : ces points restent donc au repos (n^o 312, 2^o). Tous les points qui restent au repos constituent des **nœuds de vibration**.

Le plan de propagation présente des courbes hyperboliques de repos (traits pleins renforcés) alternant avec des courbes hyperboliques de mouvement d'amplitude maximum (traits pointillés renforcés). Les hyperboles de repos permanent constituent les **franges d'interférence**.

Si les deux mouvements vibratoires n'ont pas la même amplitude, les franges d'interférence sont caractérisées par un mouvement d'amplitude minimum.

On peut réaliser expérimentalement des franges d'interférence en frappant la surface d'une nappe de mercure au moyen de deux pointes voisines disposées sur une lame vibrante. Ces deux pointes constituent, en effet, des sources de mouvements vibratoires identiques.

315. CONDITION D'INTERFÉRENCE. — Pour tout point qui constitue un ventre de vibration, la différence de marche Δ des deux ondes c'est-à-dire la différence des espaces parcourus par ces ondes est égale à un nombre pair de demi-longueurs d'onde.

$$\Delta = 2k \frac{\lambda}{2}$$

Exemple. — Pour le point V_1 distant de S de $9\lambda/2$ et de S' de $7\lambda/2$, la différence de marche est : $\Delta = 2\lambda/2$.

Pour tout point qui constitue un nœud de vibration, la différence de marche Δ des deux ondes est égale à un nombre impair de demi-longueurs d'onde.

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Exemple. — Pour le point N_1 distant de S' de $8\lambda/2$ et de S de $7\lambda/2$, la différence de marche est : $\Delta = \lambda/2$.

***Étude analytique.** — L'élongation au temps t du point S et du point S' est donnée par la relation : $e = a \sin \frac{2\pi t}{T}$. Les élongations composantes en un point M situé respectivement aux distances d et d' des sources S et S' sont, pour l'onde issue de la source S :

$$e = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$$

et pour l'onde issue de la source S' :

$$e' = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d'}{\lambda} \right).$$

Puisque ces élongations ont même direction, l'élongation résultante e_M vaut :

$$e_M = e + e'; \quad e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right) + a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d'}{\lambda} \right),$$

$$e_M = 2a \cos \pi \frac{d' - d}{\lambda} \sin \pi \left(2 \frac{t}{T} - \frac{d + d'}{\lambda} \right).$$

Le point M est donc animé d'un mouvement sinusoïdal de même période T mais d'amplitude $2a \cos \pi \frac{d' - d}{\lambda}$. Cette amplitude est maximum si :

$$d' - d = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (\text{en effet : } \cos \pi \frac{d' - d}{\lambda} = 1 ;$$

$$\pi \frac{d' - d}{\lambda} = k\pi \text{ et } d' - d = k\lambda)$$

et nulle si :

$$d' - d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (\text{en effet : } \cos \pi \frac{d' - d}{\lambda} = 0 ;$$

$$\pi \frac{d' - d}{\lambda} = (2k + 1) \frac{\pi}{2} \text{ et } d' - d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

Nous retrouvons les conditions énoncées plus haut.

§ 5. RÉFLEXION.

316 RÉFLEXION DES ONDES.

Expériences. — 1. Une déformation qui se propage le long d'un tube en caoutchouc fixé par une de ses extrémités se réfléchit sur le point d'attache (fig. 401).

2. Une compression ou une dilatation qui se propage le long d'un ressort à boudin fixé par une

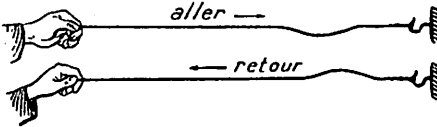


Fig. 401.

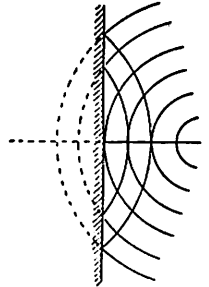


Fig. 402.

de ses extrémités se réfléchit sur le point d'attache.

3. Les ondes produites par la chute d'une pierre dans l'eau reviennent sur elles-mêmes lorsqu'elles rencontrent la berge (fig. 402).

Conclusion. — Les ondes se réfléchissent lorsqu'elles frappent une paroi rigide.

317. ONDES STATIONNAIRES. — Lorsqu'un mouvement vibratoire entretenu est réfléchi dans la direction incidente, les points

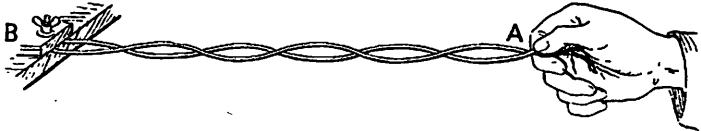


Fig. 403.

situés le long de cette direction sont soumis à deux mouvements vibratoires de même période : le mouvement vibratoire incident et le mouvement vibratoire réfléchi. La composition de ces deux mouvements donne naissance aux phénomènes d'interférence appelés **ondes stationnaires**.



Fig. 404.

Expériences. — 1^o) Animons l'extrémité libre A d'un long tube de caoutchouc d'un mouvement vibratoire régulier. Pour des périodes déterminées du mouvement vibratoire, nous observons que certains points équidistants les uns des autres restent constamment fixes (nœuds) tandis que certains points équidistants également les uns des autres sont animés de mouvements d'amplitude maximum (ventres). Le tube est le siège d'**ondes stationnaires transversales** (fig. 403 et 404). Selon que l'extrémité B du tube est fixe ou libre, nous constatons que le point de réflexion est un nœud ou un ventre.

2^o) Animons l'extrémité libre d'un ressort à boudin d'un mouvement vibratoire régulier. Pour des périodes déterminées du mouvement vibratoire, nous observons des spires N absolument

immobiles (nœuds) et des spires V animées de mouvements d'amplitude maximum (ventres). Nous remarquons également que les nœuds sont les centres de dilatation et de condensation successives. Le ressort est le siège

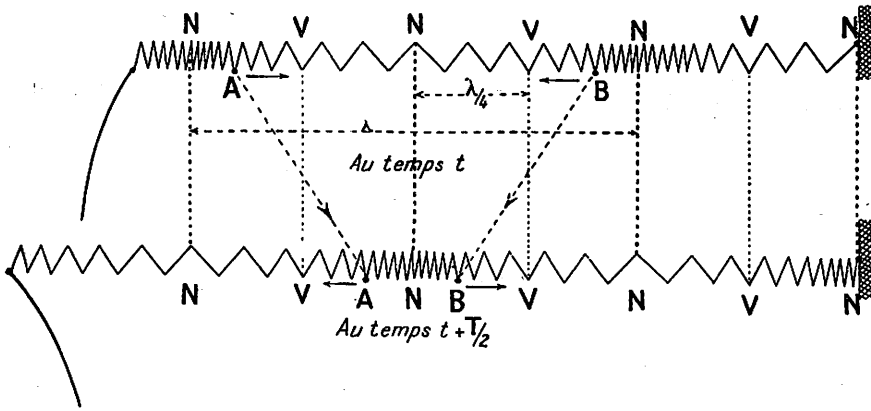


Fig. 405.

d'ondes stationnaires longitudinales (fig. 405). Selon que l'obstacle contre lequel se produit la réflexion est fixe ou libre, le point de réflexion est un nœud ou un ventre.

Nœud et ventre. — Quelle est la distance l qui, dans les ondes stationnaires, sépare un nœud et un ventre immédiatement voisins?

Au nœud N (fig. 406), la différence de marche Δ_N entre l'onde

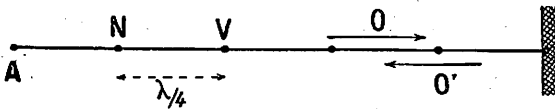


Fig. 406.

incidente O et l'onde réfléchie O' est égale à un nombre impair de demi-longueurs d'onde ($n^{\circ} 313$) :

$$\Delta_N = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Au fur et à mesure que le point considéré se rapproche de l'obstacle réfléchissant, le retard Δ de l'onde réfléchie O' sur l'onde incidente O diminue. Au ventre V, immédiatement voisin du nœud N, le retard entre les deux ondes a diminué de deux fois la distance l (trajet aller et retour); la différence de marche Δ_V entre les deux ondes y est donc :

$$\Delta_V = \Delta_N - 2l.$$

Or, au ventre V, la différence de marche Δ_V entre les deux ondes est égale à un nombre pair de demi-longueurs d'onde. Ce nombre doit

être immédiatement inférieur au nombre $2k + 1$; il ne peut être que $2k$. La différence de marche Δ_v vaut donc :

$$\Delta_v = 2k \frac{\lambda}{2}$$

La distance l qui sépare un nœud et un ventre immédiatement voisins est donc égale à :

$$l = \frac{\Delta_N - \Delta_v}{2}; \quad l = \frac{(2k + 1) \frac{\lambda}{2} - 2k \frac{\lambda}{2}}{2}$$

$$l = \frac{\lambda}{4}$$

***Étude analytique.** — Un mouvement vibratoire se propageant suivant la droite AB et se réfléchissant en B ne donne pas nécessairement naissance à des ondes stationnaires. L'extrémité origine A constitue toujours un ventre.

1°) Si l'obstacle est fixe, l'extrémité B est un nœud (fig. 407). Pour que l'extrémité A soit un ventre de vibration, il faut que la distance AB, que nous désignerons par l , soit égale à 1, 3, 5, 7 ... $(2k + 1) \lambda/4$:

$$l = (2k + 1) \frac{\lambda}{4}; \quad l = (2k + 1) \frac{VT}{4}$$

$$l = (2k + 1) \frac{V}{4\nu}$$

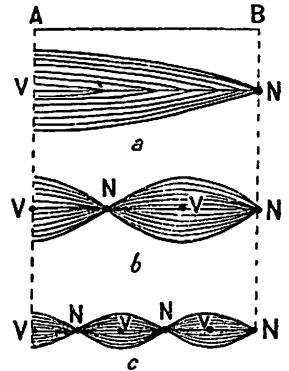


Fig. 407.

Les fréquences des mouvements vibratoires donnant naissance aux ondes stationnaires sont alors définies par la relation :

$$\nu = (2k + 1) \frac{V}{4l}$$

Examinons quelques systèmes d'ondes stationnaires susceptibles d'être obtenus :

- | | | | |
|----------------|------------------|---------------|-------------|
| a) un nœud | $l = \lambda/4$ | $\nu = V/4l$ | (fig. 407a) |
| b) deux nœuds | $l = 3\lambda/4$ | $\nu = 3V/4l$ | (fig. 407b) |
| c) trois nœuds | $l = 5\lambda/4$ | $\nu = 5V/4l$ | (fig. 407c) |

2^o) Si l'obstacle est libre, l'extrémité B est un ventre (fig. 408). Pour que l'extrémité A soit un ventre de vibration, il faut que la distance AB soit égale à 2, 4, 6, 8 ... $2k\lambda/4$:

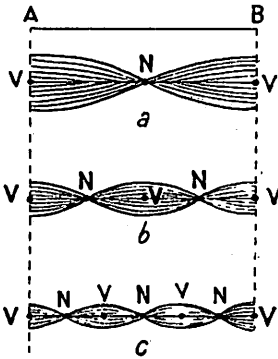


Fig. 408.

$$l = 2k \frac{\lambda}{4}; \quad l = 2k \frac{VT}{4}; \quad l = 2k \frac{V}{4\nu}$$

Les fréquences des mouvements vibratoires donnant naissance aux ondes stationnaires sont alors définies par la relation :

$$\nu = 2k \frac{V}{4l}$$

Examinons quelques systèmes d'ondes stationnaires susceptibles d'être obtenus :

- a) un nœud $l = \lambda/2 \quad \nu = V/2l$ (fig. 408a)
- b) deux nœuds $l = 2\lambda/2 \quad \nu = 2V/2l$ (fig. 408b)
- c) trois nœuds $l = 3\lambda/2 \quad \nu = 3V/2l$ (fig. 408c)

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — On anime l'extrémité d'un tuyau en caoutchouc de 3 mètres de longueur d'un mouvement vibratoire comportant deux vibrations par seconde. Il se produit un régime d'ondes stationnaires comprenant deux nœuds dont l'un est constitué par le crochet auquel est attaché le tuyau de caoutchouc. 1^o) Calculer la vitesse de propagation de la déformation le long du tuyau de caoutchouc. 2^o) Pour quelle fréquence obtiendrons-nous un régime d'ondes stationnaires comportant 3 nœuds, 4 nœuds ?

SOLUTION. — 1^o) Puisque le régime d'ondes stationnaires comporte deux nœuds et que l'extrémité du tuyau de caoutchouc qu'on anime d'un mouvement vibratoire constitue un ventre, il y a trois intervalles ventre-nœud (fig. 407 b).

$$l = 3 \frac{\lambda}{4}; \quad \lambda = \frac{4l}{3}; \quad \lambda = \frac{4 \cdot 300}{3} = 400 \text{ cm.}$$

$$V = \lambda\nu; \quad V = 400 \cdot 2 = 800 \text{ cm/s.}$$

$$2^{\circ}) \text{ 3 nœuds : } l = 5\lambda/4; \quad \nu = 5V/4l; \quad \nu = \frac{5 \cdot 800}{4 \cdot 300} = \frac{10}{3}$$

$$4 \text{ nœuds : } l = 7\lambda/4; \quad \nu = 7V/4l; \quad \nu = \frac{7 \cdot 800}{4 \cdot 300} = \frac{14}{3}$$

§ 6. DIFFRACTION.

318. PHÉNOMÈNE DE DIFFRACTION.

Disposons dans une cuve à mercure une cloison percée d'une fente très étroite; produisons une série d'ondes à la surface du mercure d'un des compartiments en ébranlant périodiquement un point de la surface du liquide. Nous observons, au delà de la cloison, des ondes circulaires d'amplitude très faible qui se propagent à la surface du mercure comme si elles étaient issues de la fente (fig. 409).

Ce phénomène, connu sous le nom de phénomène de diffraction, montre que la propagation des mouvements ondulatoires peut ne pas se faire uniquement en ligne droite. Il justifie le principe de Huygens (physicien hollandais : 1629-1695) : chacun des points d'un milieu élastique qui est le siège d'un mouvement vibratoire peut être considéré comme un centre d'ébranlement secondaire ; il rayonne lui-même des ondes autour de lui.

Le phénomène de diffraction explique le fait que les ondes sonores, hertziennes et lumineuses contournent les obstacles.

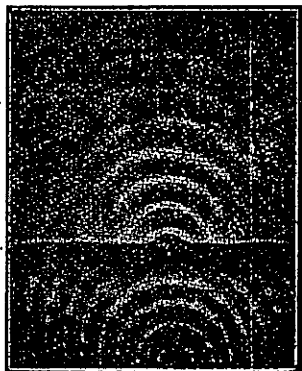


Fig. 409.

§ 7. RÉSONANCE.

319. PHÉNOMÈNES DE RÉSONANCE.

1^o) La balançoire constitue un pendule ayant une période propre d'oscillation. Si la personne qui se trouve sur la balançoire désire acquérir un mouvement de grande amplitude, elle doit rythmer ses efforts sur la période de la balançoire.

2^o) Le sonneur rythme ses tractions sur la corde de la cloche avec la période de la cloche. Il exerce une traction sur la corde chaque fois que la corde descend.

3^o) Une planche qui, fixée par ses extrémités, reçoit des impulsions concordant avec sa période propre d'oscillation peut se briser. C'est la raison d'ailleurs pour laquelle une troupe rompt le pas lors de son passage sur un pont suspendu.

Ces phénomènes constituent des phénomènes de **résonance** : des impulsions, même très faibles, rythmées sur la période propre d'oscillation d'un corps peuvent lui faire acquérir un mouvement périodique de très grande amplitude. Ce corps est appelé **résonateur**.

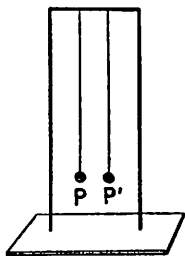


Fig. 410.

320. EFFETS PRODUITS PAR LA RÉSONANCE.

Expériences.— Suspendons deux pendules identiques P et P' à un même support (fig. 410). Ces pendules ont même période. Faisons osciller le pendule P, nous constatons : 1^o) que le pendule P' se met à osciller en synchronisme avec le pendule P ; 2^o) que le mouvement du pendule P s'amortit beaucoup plus vite que s'il oscillait seul.

Suspendons à un même support deux pendules différents : le phénomène de résonance ne se produit pas.

Conclusion. — Tout oscillateur entre en mouvement sous l'influence des oscillations qu'il peut émettre.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Une courroie relie deux poulies de diamètre D_1 et D_2 . Quelle est la relation des fréquences ν_1 et ν_2 de rotation des poulies? R: $\nu_1 D_1 = \nu_2 D_2$.

2. Les diamètres des roues, de la roue dentée du pédalier et du pignon de la roue arrière d'une bicyclette sont respectivement 80 cm, 18 cm et 5 cm. a) Quel est le nombre de tours que fait le pédalier quand le cycliste roule à 18 km/h? b) Quels sont les diamètres des roues dentées du dérailleur à placer sur la machine pour obtenir des développements de 4 m, 6,5 m et 9 m? R: a) 40 tr/min; b) 11,5 cm; 7 cm; 5 cm.

3. Une automobile de 1200 kg lancée à 72 km/h aborde un virage de 25 m de rayon de courbure. A quelle force centripète doit-elle être soumise pour effectuer le virage? R: 1920 Mdyn.

4. Un acrobate exécute un looping vertical à l'aide d'un appareil de 5 m de diamètre. Calculer : a) la vitesse linéaire minimum nécessaire à l'exécution du looping; b) la fréquence du mouvement de l'acrobate ($g = 1000 \text{ cm/s}^2$). R: 5 m/s; 0,318 cycle par seconde.

5. Déterminer la vitesse initiale à communiquer à un projectile lancé horizontalement pour que ce projectile tourne indéfiniment autour de la Terre. On ne tient pas compte de la résistance de l'air (Rayon terrestre : 6 400 km; $g = 1 000 \text{ cm/s}^2$). R: 8 km/s.

6. Un point d'une tige élastique exécute 5 vibrations complètes par seconde dont l'amplitude constante est égale à 3 cm. Quelles sont les élongations de ce point de la tige aux temps : 0,25; 0,34; 0,50; 1; 3,14; 10,3; 12,55 s si on prend comme origine des temps : a) l'instant où la tige passe par sa position d'équilibre; b) l'instant où la tige a une élongation maximum? R : a) 3; — 2,85; 0; 0; — 2,85; 0; — 3. b) 0; — 0,927; — 3; 3; — 0,927; — 3; 0.

7. Une pierre jetée dans une eau tranquille produit à la surface de l'eau un système d'ondes qui se propagent à la vitesse de 80 cm/s. La distance séparant deux crêtes consécutives est de 30 cm. On demande la fréquence de vibration du point de chute. R : $\nu = 8/3$.

8. Deux pointes A et B vibrant synchroniquement frappent 180 fois par seconde la surface d'une nappe de mercure. Sachant que la distance séparant les deux pointes est de 3 cm et que la distance séparant deux nœuds consécutifs sur la droite joignant les deux pointes est de 2,5 mm, a) calculer la vitesse de propagation des ondes à la surface du mercure; b) écrire l'équation de vibration en fonction du temps du point M situé au milieu du segment de droite AB; c) écrire l'équation de vibration en fonction du temps du point M' distant de 1,4375 cm du point A; d) écrire l'équation qui donne les élongations des points du segment de droite AB en prenant A comme origine au temps kT ; e) écrire l'équation qui donne les élongations des points du segment AB en prenant A comme origine au temps $(2k + 1)T/4$. (On prendra comme origine des temps l'instant où les points A et B ont des élongations nulles). R : $V = 45 \text{ cm/s}$. ; b) $e_M = 2a \sin 2\pi (180t - 6)$;

c) $e_{M'} = 0$; d) $e_t = 0$; e) $e_t = 2a \cos \pi \left(\frac{3 - 2x}{0.25} \right)$.

9. Dans un ressort en spirale AB long de 15 m les déformations se propagent à la vitesse de 60 m/s. Sachant que l'extrémité B du ressort est fixe, calculer la fréquence de vibration de l'extrémité A pour qu'il se produise dans le ressort un régime d'ondes stationnaires. R : 1; 3; 5; 7;...

LECTURE

LES SATELLITES ARTIFICIELS

Plus que jamais, la civilisation apparaît conditionnée par la science.

(Discours prononcé à l'inauguration de l'Exposition Universelle de Bruxelles).

BAUDOUIN I^{er}.

Pour les besoins scientifiques, l'atmosphère est divisée en (fig. 411)

troposphère, région comprise entre les altitudes 0 et 12 km; dans la troposphère que se déplacent les avions commerciaux, que se forment les nuages;

stratosphère, région comprise entre les altitudes 12 et 60 km; domaine des étoiles filantes, elle fut explorée d'abord par ballon-sonde, puis, après l'ascension de A. Piccard en 1931, par stratostat et, enfin, par fusée;

ionosphère, région comprise entre les altitudes 60 et 1000 km; elle est le théâtre des aurores boréales; elle est caractérisée par l'ionisation des particules d'air;

exosphère, région située au delà de 1000 km; elle est caractérisée par l'abondance des rayons ultra-violet et des rayons cosmiques; antichambre de l'espace interplanétaire, elle est le domaine des satellites artificiels. Le vide y est tel qu'un engin qui la sillonne ne rencontre une molécule d'air que tous les douze kilomètres.

La figure indique la pression et la température qui règnent dans les diverses zones de l'atmosphère. La température indiquée est celle qui correspond à la vitesse de translation des molécules de l'air (Tome I, n° 343). A haute altitude, la vitesse de translation des molécules est grande : la température est élevée. Mais la pression est tellement faible que les chocs des molécules sur les parois d'un engin sont très rares : la chaleur cédée aux parois lors des chocs est, par rapport à la chaleur solaire absorbée par les parois, absolument négligeable.

Les fusées sont des engins qui emportent le combustible (alcool, hydrazine, aniline, borane...) et le comburant (oxygène liquide, eau oxygénée concentrée, acide nitrique fumant...). A la fin du second conflit mondial, les Allemands lancent les fusées V2 qui atteignent l'ionosphère. Après le conflit, les Américains améliorèrent considérablement la V2. Aux fusées à un étage succèdent bientôt les fusées-gigognes : la Wac Corporal, fusée-fille, larguée à l'altitude de 32 km par une V2, fusée-mère, atteint l'altitude de 402 km (1949); la fusée-arrière-petite-fille de la fusée Jupiter C parvient à l'altitude de 1500 km (1957); la fusée-arrière-petite-fille de la fusée Farside lancée à l'altitude de 30 km à travers un ballon en plastique atteint 6400 km (1957). Ce sont des fusées-gigognes qui mettent les satellites artificiels sur leurs orbites.

Energie cinétique pour la mise sur orbite. — Pour mettre un satellite de masse M sur son orbite, il faut d'abord le soulever à l'altitude h c'est-à-dire lui communiquer une énergie potentielle.

Pour les altitudes faibles, le travail pour amener un corps de masse M à l'altitude h est donné par la relation (Tome I, n° 97).

$$T = Mgh$$

Pour les altitudes élevées auxquelles se meuvent les satellites artificiels, il y a lieu de tenir compte de la variation de g avec l'altitude h (Tome I, n° 65)

$$g_h = \frac{KM_T}{(R + h)^2}$$

R : rayon de la Terre (6378 km).

M_T : masse de la Terre.

Pour une faible variation d'altitude dh au cours de laquelle nous pouvons considérer que l'accélération de la pesanteur g_h reste constante, le travail élémentaire dT est

$$dT = Mg_h dh$$

$$dT = K \frac{M_T M}{(R + h)^2} dh.$$

Le travail à effectuer pour soulever le satellite à l'altitude h est égal à la somme de tous les petits travaux élémentaires. Les mathématiques montrent que le travail est donné par la relation

$$T = MgR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + h} \right) \quad (1)$$

dans laquelle g est l'accélération au sol.

Pour h infini c'est-à-dire pour libérer le satellite de l'attraction terrestre la relation devient

$$\left(\frac{1}{R + h} = 0 \right)$$

$$T = MgR \quad (2)$$

Dans les relations (1) et (2), il n'a pas été tenu compte de la résistance de l'air.

Pour le lecteur non averti du calcul infinitésimal, recourons à un procédé graphique sur carton fort d'épaisseur uniforme. Représentons la Terre par un cercle de centre O (fig. 412). De ce point O , traçons une droite OZ perpendiculaire à l'axe des pôles. Aux points $A, B, C, D, E, F, G \dots$ distants respectivement du point O de $R, 2R, 3R, 4R, 5R, 6R, 7R \dots$, élevons les perpendiculaires $AP, BG, CR, DS, ET, FU, GV \dots$ respectivement égales à $g, g/4, g/9, g/16, g/25, g/36, g/49 \dots$ et réunissons par une courbe les points $P, Q, R, S, T, U, V \dots$: cette courbe représente la variation de l'accélération due à la pesanteur en fonction de la distance au centre de la Terre.

Partageons la distance AB en petites distances Δh . Considérons le point a très proche du point A pour que nous puissions admettre que la valeur de g_A est constante de A à a : le travail pour faire passer de A à a la masse unitaire est

$$T_{Aa} = g_A \cdot Aa.$$

Or, le produit $g_A \cdot Aa$ est égal à l'aire du rectangle $aAPb$. Donc, le travail pour faire passer du sol à l'altitude a la masse unitaire est

$$T_{Aa} = \text{aire } aAPb.$$

Considérons un point e très proche du point a pour que nous puissions admettre que la valeur de g_a reste constante de a à e : le travail pour faire passer de a à e la masse unitaire est

$$T_{ae} = g_a \cdot ae.$$

Or, le produit $g_a \cdot ae$ est égal à l'aire du rectangle $acde$. Donc, le travail pour faire passer de l'altitude e la masse unitaire est

$$T_{ae} = \text{aire } acde$$

et ainsi de suite. Le travail nécessaire pour faire passer la masse unitaire du sol à l'altitude B est égal à la somme des aires de tous les petits rectangles.

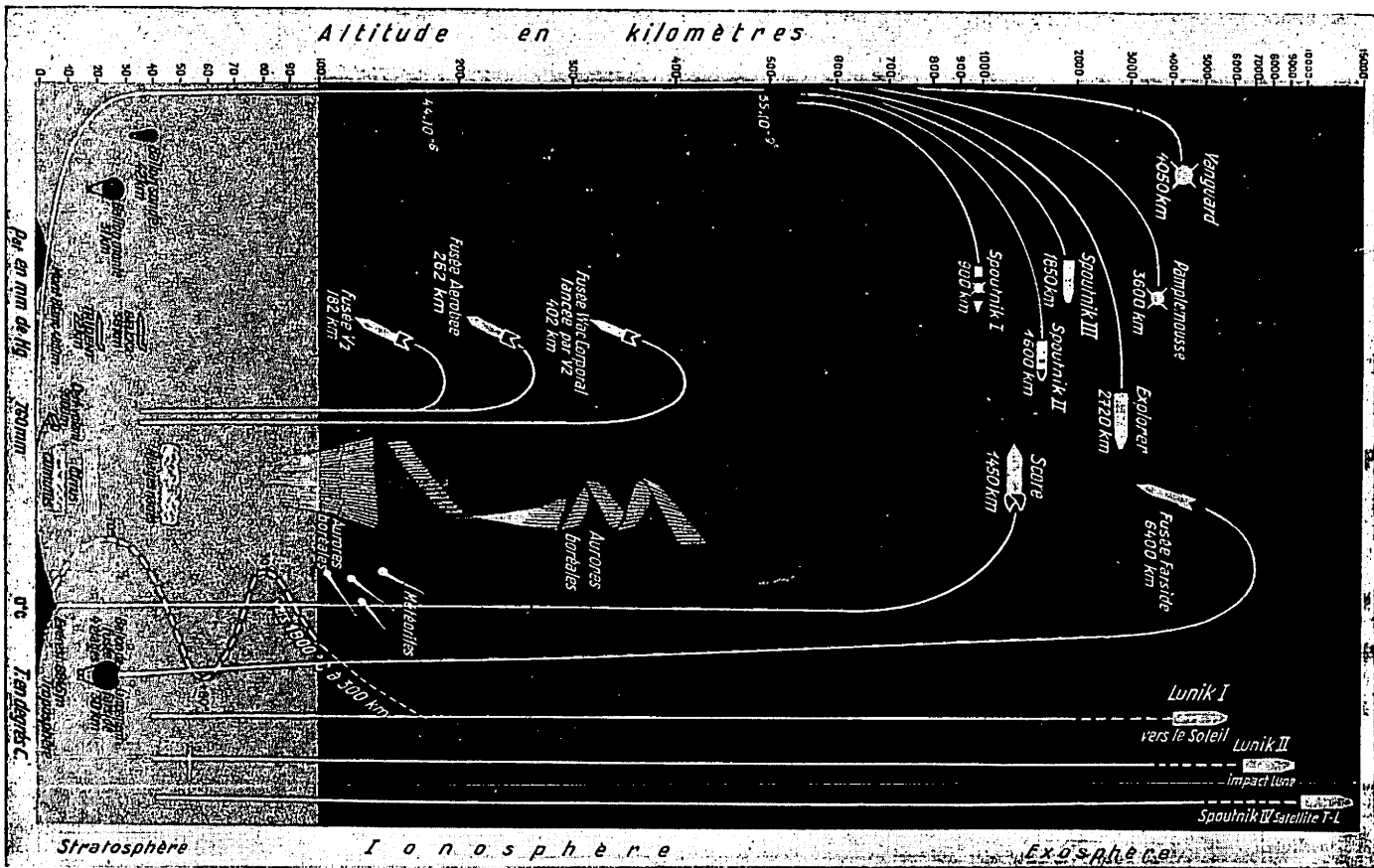


Fig. 411.

Le graphique de la figure 413 donne l'énergie potentielle à fournir pour amener sur son orbite un satellite de masse unitaire (1 kg) en fonction de la distance séparant l'orbite du centre de la Terre.

Par application de la relation (1), on calcule l'énergie potentielle à fournir pour amener un satellite de masse unitaire (1 kg) sur une orbite distante de 1000 km de la Terre :

$$T_{AB} = \text{aire } aAPb + \text{aire } acde + \dots$$

Le travail T_{AB} nécessaire pour faire passer la masse unitaire du sol à l'altitude B se rapproche d'autant plus de l'aire $APOB$ que les petites distances Δh sont plus nombreuses. A la limite, le travail nécessaire pour faire passer la masse unitaire du sol en un point distant de $2R$ du centre de la Terre est

$$T_{AB} = \text{aire } APQB.$$

Par extension du raisonnement, le travail nécessaire pour faire passer la masse unitaire du sol en un point situé à l'infini est

$$T = \text{aire } APZ.$$

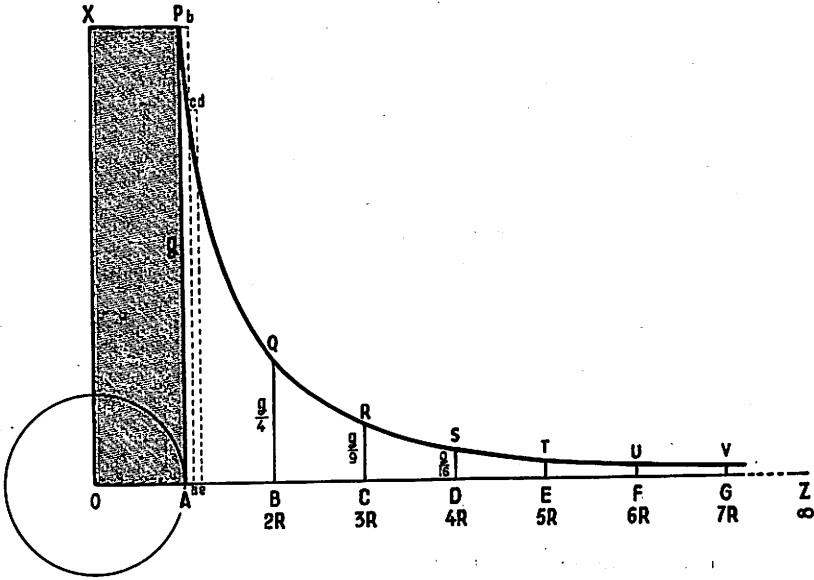


Fig. 412.

Construisons le rectangle $OXAP$ dont la surface vaut gR . Découpons dans le carton l'aire $OXAP$ et l'aire $APUG$ très sensiblement égal à l'aire APZ . Pesons l'aire $OXAP$ et l'aire $APUG$: ils accusent le même poids

$$\text{aire } APZ = \text{aire } OXAP.$$

Donc, le travail nécessaire pour amener la masse unitaire de la surface de la Terre à l'infini est

$$T = gR.$$

La relation $T = gR$, extrapolation de la relation $T = gR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right)$, étant établie, nous admettons que la relation

$$T = gR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right)$$

exprime le travail pour faire passer la masse unitaire du sol à l'altitude h .

$$T = MgR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + h} \right);$$

$$Tp = 1 \cdot (6378 \cdot 10^3)^2 \left(\frac{1}{6378 \cdot 10^3} - \frac{1}{7378 \cdot 10^3} \right) = 365\,000 \text{ kgm.}$$

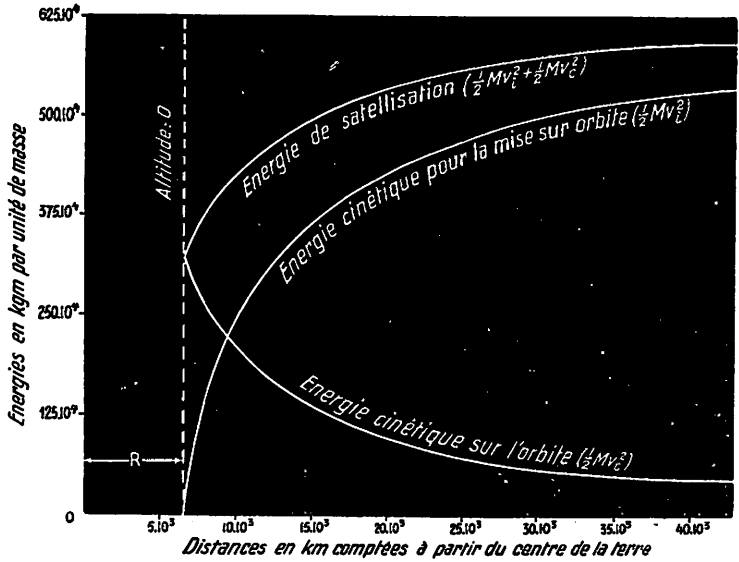


Fig. 413.

Par application de la relation (2), on calcule l'énergie potentielle nécessaire pour amener la masse unitaire (1 kg) à l'infini ou l'énergie de libération pour la Terre

$$T = MgR; \quad Tp = 1 \cdot 6378 \cdot 10^3 = 6\,378\,000 \text{ kgm.}$$

L'énergie potentielle qu'a nécessitée la mise du Spoutnik (84 kg) sur son orbite située à l'altitude de 900 km. est

$$Tp = MgR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + h} \right);$$

$$Tp = 84 \cdot (6378 \cdot 10^3)^2 \left(\frac{1}{6378 \cdot 10^3} - \frac{1}{7278 \cdot 10^3} \right) = 66\,000\,000 \text{ kgm}$$

c'est-à-dire approximativement l'énergie potentielle qu'exigerait le transport d'une charge de 7500 kg du niveau de la mer au sommet de l'Everest si l'accélération due à la pesanteur restait égale à sa valeur au niveau de la mer.

Généralement, on exprime l'énergie en fonction de la vitesse initiale verticale V_i à donner au satellite au départ de la Terre pour atteindre l'altitude h de son orbite : elle s'obtient en égalant l'énergie cinétique du satellite au départ de la Terre à l'énergie potentielle du satellite sur son orbite

$$\frac{MV_i^2}{2} = MgR^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right)$$

$$V_i = R \sqrt{2g \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R+h} \right)}$$

$$V_i = \sqrt{2gR} \sqrt{\frac{h}{R+h}} \quad (3)$$

En remplaçant g et R par leurs valeurs respectives $9,78 \text{ m/s}^2$ et $6378 \cdot 10^3 \text{ m}$ dans la relation (3), on obtient la relation

$$V_i = 11\,180 \sqrt{\frac{h}{R+h}} \quad (4)$$

qui donne la vitesse initiale en mètres par seconde.

Cette relation devient pour h infini

$$V_i = 11\,180 \text{ m/s ou } 11,18 \text{ km/s.}$$

Cette vitesse est la vitesse initiale à communiquer à un mobile, quelle qu'en soit la masse, pour atteindre un point à l'infini ou vitesse de libération pour la Terre.

La vitesse initiale à communiquer à un mobile, quelle qu'en soit la masse, pour atteindre l'altitude de 1000 km est

$$V_i = 11\,180 \sqrt{\frac{h}{R+h}}$$

$$V_i = 11\,180 \sqrt{\frac{1000 \cdot 10^3}{6378 \cdot 10^3 + 1000 \cdot 10^3}} = 4150 \text{ m/s ou } 4,15 \text{ km/s.}$$

La vitesse initiale théorique communiquée au Spoutnik I est

$$V_i = 11\,180 \sqrt{\frac{h}{R+h}}$$

$$V_i = 11\,180 \sqrt{\frac{900 \cdot 10^3}{6378 \cdot 10^3 + 900 \cdot 10^3}} = 3900 \text{ m/s ou } 3,9 \text{ km/s.}$$

On ne communique pas brutalement de telles vitesses au départ car le frottement de l'air volatiliserait le satellite : la fusée-porteuse accélère le satellite.

Energie cinétique sur l'orbite. — Amené sans vitesse à l'altitude h , le satellite retomberait sur la Terre comme le fait une pierre que nous lançons verticalement vers le haut. A l'altitude h , le satellite doit être animé d'une vitesse horizontale appelée vitesse orbitale V_c . Cette vitesse orbitale le maintiendra sur son orbite. En effet, la force d'attraction de la Terre sur le satellite (loi de Newton)

$$F = K \frac{M_T M}{(R+h)^2}$$

lui communique une accélération centripète (n° 293)

$$A = \frac{V_c^2}{R+h}$$

qui le maintient sur son orbite.

$$K \frac{M_T M}{(R+h)^2} = \frac{MV_c^2}{R+h}$$

d'où

$$V_c^2 = \frac{KM_T}{R^2} \cdot \frac{R^2}{R+h}; \quad V_c^2 = g \frac{R^2}{R+h};$$

$$V_c = \sqrt{gR} \sqrt{\frac{R}{R+h}} \quad (5)$$

En remplaçant g et R par leurs valeurs respectives $9,78 \text{ m/s}^2$ et $6378 \cdot 10^3 \text{ m}$ dans la relation (5), on obtient la relation

$$V_c = 7900 \sqrt{\frac{R}{R+h}} \quad (6)$$

qui donne la vitesse orbitale en mètres par seconde.

Le graphique de la figure 414 donne la vitesse orbitale en fonction de la distance au centre de la Terre.

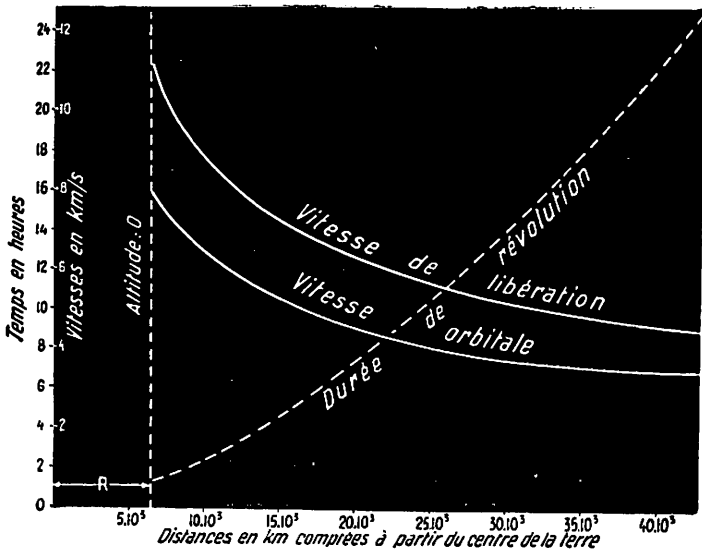


Fig. 414.

La vitesse orbitale d'un satellite évoluant à 1000 km d'altitude est

$$V_c = 7900 \sqrt{\frac{R}{R+h}}$$

$$V_c = 7900 \sqrt{\frac{6378 \cdot 10^3}{6378 \cdot 10^3 + 1000 \cdot 10^3}} = 7300 \text{ m/s ou } 7,3 \text{ km/s.}$$

La vitesse orbitale théorique du Spoutnik I est

$$V_c = 7900 \sqrt{\frac{R}{R+h}}$$

$$V_c = 7900 \sqrt{\frac{6378 \cdot 10^3}{6378 \cdot 10^3 + 900 \cdot 10^3}} = 7400 \text{ m/s ou } 26640 \text{ km/h.}$$

A l'origine, la vitesse du Spoutnik I était de 27 500 km/h.

L'énergie cinétique du satellite sur son orbite est

$$T_c = \frac{MV_c^2}{2} \quad (7)$$

Le graphique de la figure 413 donne l'énergie cinétique d'un satellite de masse unitaire (1 kg) exprimée en kilogrammètres en fonction de la distance au centre de la Terre.

L'énergie cinétique par masse unitaire du satellite évoluant à 1000 km d'altitude est

$$T_e = \frac{MV_c^2}{2}; \quad T_c = \frac{1.7300^2}{9,78 \cdot 2} = 2740000 \text{ kgm.}$$

L'énergie cinétique sur l'orbite du Spoutnik I est

$$T_c = \frac{MV_c^2}{2}; \quad T_c = \frac{84.7400^2}{2 \cdot 9,78} = 230000000 \text{ kgm}$$

c'est-à-dire approximativement l'énergie qu'exigerait le transport d'une charge de 27 000 kg du niveau de la mer au sommet de l'Everest si l'accélération due à la pesanteur restait égale à sa valeur au niveau de la mer. Quant à la durée de révolution T du satellite, elle est donnée par la relation (n° 292)

$$V_c = \frac{2\pi(R+h)}{T}; \quad T = \frac{2\pi(R+h)}{V_c}; \quad T = \frac{2\pi(R+h)}{\sqrt{\frac{gR^2}{R+h}}};$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \sqrt{\left(\frac{R+h}{R}\right)^3} \quad (8)$$

d'où, en remplaçant g par sa valeur 9,78 m/s² et R par sa valeur 6378 km et en divisant par 3600, on obtient la durée de révolution en heures :

$$T = 1,4 \sqrt{\left(\frac{R+h}{R}\right)^3}$$

La durée de révolution du satellite augmente avec l'éloignement de la Terre.

La durée de révolution d'un satellite évoluant à 1000 km d'altitude est

$$T = 1,4 \sqrt{\left(\frac{R+h}{R}\right)^3};$$

$$T = 1,4 \sqrt{\left(\frac{6378 + 1000}{6378}\right)^3} = 1 \text{ h } 45 \text{ min.}$$

La durée de révolution théorique du Spoutnik I est

$$T = 1,4 \sqrt{\left(\frac{R+h}{R}\right)^3};$$

$$T = 1,4 \sqrt{\left(\frac{6378 + 900}{6378}\right)^3} = 1 \text{ h } 42 \text{ min.}$$

A l'origine, la durée de révolution était de 1 h 36 min. A cause de la présence d'une atmosphère résiduelle, la durée de révolution décroissait de 2,28 secondes par jour.

Energie de satellisation. — L'énergie de satellisation, énergie qu'il faut donner à un mobile pour qu'il devienne satellite, est égale à la somme de l'énergie cinétique au départ de la Terre et de l'énergie cinétique sur l'orbite

$$T_s = \frac{MV_i^2}{2} + \frac{MV_c^2}{2} \quad (9)$$

Le graphique de la figure 413 donne l'énergie de satellisation pour une masse unitaire (1 kg) : l'énergie de satellisation est d'autant plus faible que l'orbite est plus proche de la Terre. On comprend dès lors la raison pour laquelle les satellites artificiels évoluent sur des orbites voisines de la Terre.

L'énergie de satellisation d'un satellite de masse unitaire (1 kg) évoluant à 1000 km de la Terre :

$$T_s = \frac{MV_i^2}{2} + \frac{MV_c^2}{2}; \quad T_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{9,78} (4150^2 + 7300^2) = 3\,600\,000 \text{ kgm.}$$

L'énergie de satellisation théorique du Spoutnik I est

$$T_s = \frac{MV_i^2}{2} + \frac{MV_c^2}{2}; \quad T_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{84}{9,78} (3900^2 + 7400^2) = 300\,000\,000 \text{ kgm}$$

c'est-à-dire approximativement l'énergie qu'exigerait le transport d'une charge de 35 000 kg du niveau de la mer au sommet de l'Everest si l'accélération due à la pesanteur restait égale à sa valeur au niveau de la mer.

Engin-porteur. — L'engin-porteur d'un satellite est une fusée-gigogne dont les premiers étages sont guidés automatiquement. Dans la fusée Vanguard, qui a tout récemment mis sur son orbite le Pamplemousse I (satellite américain : diamètre : 16 cm; masse : 1460 g), la fusée-mère, propulsée par un moteur à kérosène-oxygène liquide développant une poussée de 12 t', atteint en 150 secondes l'altitude de 57 km; la fusée-fille, mue par un moteur à diméthylhydrazine - acide nitrique fumant développant une poussée de 3375 kg', s'élève en 120 secondes à l'altitude de 480 km; la fusée-petite-fille, stabilisée de manière que son axe longitudinal soit sensiblement parallèle à la surface de la Terre et propulsée par un moteur à carburant solide de composition tenue secrète développant une poussée de 1058 kg', libère après 30 secondes de fonctionnement, le Pamplemousse I avec une vitesse relative de 1 m/s. Le Pamplemousse I s'éloigne progressivement de la fusée-petite-fille qui, à l'instar du satellite, se met à tourner autour de la Terre. Quant à l'énergie mise en jeu pour atteindre l'orbite,

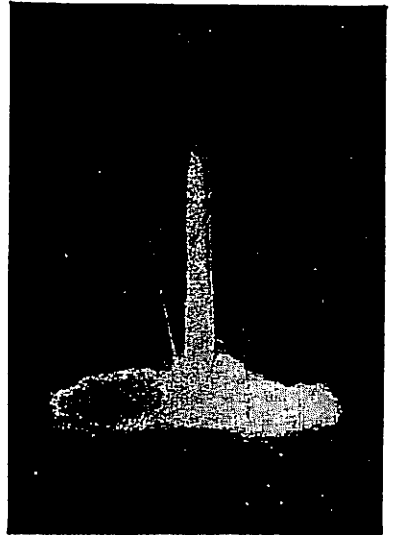


Fig. 415. — Départ de la fusée Jupiter C. Mise sur l'orbite de l'Explorer I (Etats-Unis, janvier 1958).

elle se répartit comme suit :

1 ^{er} étage	65 %
2 ^e étage	35 %

tandis que la vitesse orbitale est due pour
 15 % au 1^{er} étage 32 % au 2^e étage 50 % au 3^e étage

La Terre fournit au départ du satellite 3 % de la vitesse orbitale.

Voyage interplanétaire. — La relation (4) généralisée

$$V_i = \sqrt{\frac{2gR}{n}}, \quad (9)$$

dans laquelle n représente le nombre de rayons terrestres, permet de calculer la vitesse de libération à partir d'un point quelconque de l'espace environnant la Terre. Le graphique de la figure 414 donne la vitesse de libération en fonction de la distance à la Terre : comme la vitesse orbitale, la vitesse de libération diminue à mesure que l'on s'éloigne de la Terre ou de tout autre astre. La relation (9) est théorique : il est fait abstraction de la rotation de la Terre, de l'existence d'autres astres, de la présence d'une atmosphère...

Imaginons, comme l'a fait Jules Verne dans son roman « De la Terre à la Lune », que nous puissions utiliser un canon dirigé verticalement pour envoyer des engins dans l'exosphère. Faisant abstraction de la résistance de l'air, utilisons les relations classiques

$$V = V_0 - gt \quad (10)$$

et

$$h = V_0 t - \frac{gt^2}{2} \quad (11)$$

De la relation (10), tirons t que nous portons dans la relation (11) : nous obtenons la relation

$$V_0 = \sqrt{V^2 + 2gh} \quad (12)$$

qui permet de calculer que la vitesse à la sortie de l'arme à feu aurait dû être pour

Sputnik I (84 kg)	8,6 km/s	(vit. orb. théor. : 7,4 km/s)
Sputnik II (504 kg)	9,1 km/s	(vit. orb. théor. : 7 km/s)
Explorer I (14 kg)	10,1 km/s	(vit. orb. théor. : 6,7 km/s)
Pamplémousse I (1,46 kg)	10,9 km/s	(vit. orb. théor. : 6,2 km/s)

Pour atteindre la vitesse théorique de libération pour la Terre (11,18 km/s) il ne manquait à (1)

Sputnik I	que	2,6 km/s
Sputnik II	que	2,1 km/s
Explorer I	que	1,1 km/s
Pamplémousse I	que	0,3 km/s

Un engin américain et un engin russe, destinés à la Lune, ont échappé à l'attraction lunaire : ils ont été planétisés c'est-à-dire placés sur une orbite autour du Soleil. Ces engins qui constituent les deux premières planètes artificielles ont atteint la vitesse de libération pour la Terre.

Le Lunik II a atteint la Lune, Le Lunik III, que les Russes appellent Spoutnik IV, décrit une ellipse autour de la Terre et de la Lune : il constitue le premier satellite Terre-Lune.

Si nous étions des Martiens, des Mercuriens, des Sélénites..., il nous suffirait d'acquérir une vitesse de 5 km/s, 4,3 km/s, 2,4 km/s... (2) pour nous évader de notre habitat : il y a belle lurette que nous sillonnerions l'espace interplanétaire.

L'aube de l'ère de la navigation interplanétaire se lève.

(1) On aurait tort de s'imaginer que les satellites américains sont supérieurs aux satellites russes : il a fallu dépenser bien plus d'énergie pour satelliser Spoutnik I (83,6 kg) et Spoutnik II (504 kg) que pour satelliser Explorer I (14 kg), Pamplémousse I (1,45 kg) et Explorer III (14 kg).

(2) Remarquons que l'attraction de la Terre permettrait de gagner quelque 4 % sur la vitesse initiale : compte tenu de l'attraction de la Terre, la vitesse de libération pour la Lune est de 2,27 km/s.

CHAPITRE II.

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES EN ACOUSTIQUE.

§ 1. PRODUCTION, PROPAGATION ET PERCEPTION DES SONS.

321. PRODUCTION DES SONS.

Expériences. — 1. Une tige métallique, fixée par une extrémité dans un étau, produit un son quand elle exécute des vibrations suffisamment rapides (fig. 416).

2. Un fil métallique tendu qui exécute des vibrations émet un son (fig. 434).

3. Un diapason frappé par un marteau produit un son. Les vibrations du diapason peuvent être mises en relief au moyen d'un pendule formé d'une bille légère suspendue par un fil : la bille subit des chocs qui l'écartent de sa position d'équilibre (fig. 417).

4. Une cloche en cristal dont le bord a été frotté par un archet émet un son.

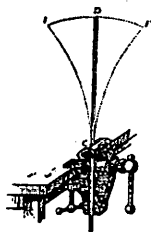


Fig. 416.

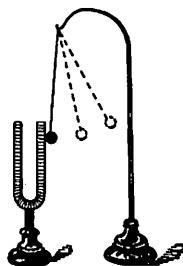


Fig. 417.

Les soubresauts de quelques grains de sable introduits dans la cloche en manifestent les vibrations.

5. Un tampon d'ouate ne peut émettre un son ; ce corps n'exécute pas de vibrations.

Conclusion. — Toute source sonore est constituée par un corps élastique animé d'un mouvement vibratoire.

322. PROPAGATION DES SONS.

Expériences. — 1. **Le vide ne propage pas le son.** — Suspendons dans la cloche d'une machine pneumatique une sonnerie électrique et faisons le vide. Lorsque le courant passe, nous voyons le marteau frapper le timbre mais nous ne percevons aucun son.

2. **Les gaz propagent le son.** — Laissons rentrer l'air lentement dans la cloche de la machine pneumatique. Nous percevons un son qui devient de plus en plus intense au fur et à mesure que l'air rentre dans la cloche.

3. Les liquides propagent le son. — Un plongeur entend les sons émis sur le rivage.

4. Les solides propagent le son. — Plaçons une montre à l'extrémité d'une longue table. Pour entendre, à l'autre extrémité, le tic-tac de la montre, nous appliquons l'oreille contre la table.

Conclusion. — La perception d'un son nécessite entre la source sonore et l'oreille une série ininterrompue de milieux matériels élastiques susceptibles de répéter les vibrations de la source sonore.

Pour assourdir les sons, on interpose entre la source sonore et l'oreille des solides peu élastiques c'est-à-dire des solides qui ne peuvent répéter les vibrations : laine, ouate, crins, tentures, etc.

323. MÉCANISME DE LA PROPAGATION DANS LES GAZ. — Les vibrations de la source sonore ont pour effet de comprimer et de dilater alternativement le gaz en contact avec elle. Ces déformations transmises au milieu gazeux ne se propagent pas instantanément à tout le milieu; il en résulte sur la direction de propagation une alternance de demi-ondes condensées et de demi-ondes dilatées (n° 310).

324. VITESSE DE PROPAGATION DU SON. — L'observation courante nous apprend : 1^o) que le son se propage moins rapidement que la lumière : lorsque nous regardons, à quelque distance, un bûcheron au travail, nous voyons d'abord la hache s'abattre sur l'arbre, nous entendons ensuite le bruit du choc; 2^o) que tous les sons se propagent avec la même vitesse : lorsque nous nous éloignons d'un orchestre, nous ne constatons aucune déformation du morceau de musique exécuté.

A. Vitesse de propagation dans l'air.

Les mesures précises de la vitesse du son furent entreprises en 1822 sous la direction d'Arago. Les observateurs s'installèrent sur deux collines distantes de 29 km. Les observateurs de la colline A déterminaient le retard de l'impression auditive d'un coup de canon tiré de la colline B sur l'impression visuelle de la lueur accompagnant le coup. Réciproquement, pour éliminer l'influence du vent, les observateurs de la colline B effectuaient la même détermination pour un coup tiré de la colline A. La vitesse de la lumière étant de 300 000 km/s, on pouvait considérer que le retard entre l'impression visuelle et l'impression auditive mesurait le temps mis par le son pour franchir les 29 km séparant les collines. Les expériences basées sur cette méthode des coups alternés furent répétées plusieurs fois. Les observateurs, en considérant la moyenne des résultats obtenus, déduisirent que la vitesse du son dans l'air à 16° est de 340 m/s.

Pour éviter l'erreur personnelle de l'observateur, Regnault perfectionna en 1862 la méthode d'Arago en enregistrant graphiquement le coup de départ et le coup d'arrivée.

La vitesse du son, qui est indépendante de la pression, varie avec la température : à 0° : 332 m/s; à 6° : 337 m/s; à 16° : 340 m/s

B. Vitesse de propagation dans les liquides. — Par une expé-

rience directe, analogue à celle décrite pour l'air, on observa que la vitesse du son dans l'eau est à 8° de 1 435 m/s.

C. Vitesse de propagation dans les solides.

A un instant déterminé, un expérimentateur frappe d'un coup de marteau l'extrémité d'un long tuyau en fonte rempli d'air. Un second expérimentateur applique l'oreille à l'autre extrémité du tuyau et note le retard de l'onde sonore transmise par l'air sur le son transmis par le solide.

On déduit de l'expérience que la vitesse du son dans la fonte est de 3 570 m/s.

***325. FORMULE DE LAPLACE.** — Newton, puis Laplace ont montré que la vitesse V de propagation des ondes longitudinales dans un milieu de masse spécifique M et de coefficient d'élasticité E est donnée par la relation :

$$v = \sqrt{\frac{E}{M}}$$

Pour les solides, le coefficient E est le module d'élasticité.

Pour les liquides, le coefficient E est égal à l'inverse du coefficient de compressibilité : $E = 1/C$.

Pour les gaz, le coefficient E proportionnel à la pression p_T du gaz est relié à cette dernière par la relation : $E = kp_T$ ($k = 1,41$ pour les gaz biatomiques, rapport de la chaleur spécifique à pression constante à la chaleur spécifique à volume constant. Tome I, n° 203). La vitesse de propagation du son dans un gaz est donc donnée par la relation :

$$v = \sqrt{\frac{kp_T}{M_T}}$$

Or, la masse spécifique M_T d'un gaz est reliée à la masse spécifique normale M_0 par la relation (Tome I, n° 238) :

$$M_T = M_0 \cdot \frac{p_T}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha T}$$

Donc, la vitesse de propagation du son (exprimée en centimètres par seconde si tous les facteurs sont exprimés en unités C. G. S.) dans un gaz est :

$$v = \sqrt{\frac{kp_T}{M_0 \cdot \frac{p_T}{p_0} \cdot \frac{1}{1 + \alpha T}}}; \quad v = \sqrt{\frac{kp_0}{M_0} (1 + \alpha T)}$$

La vitesse du son dans un gaz est indépendante de la pression; elle

dépend de la température et de la masse spécifique normale du gaz. Ces déductions sont vérifiées par l'expérience.

326. PERCEPTION DES SONS. — L'oreille, organe de perception, comprend (fig. 418) :

1^o) **l'oreille externe** : le pavillon recueille l'onde sonore, la canalise vers le conduit auditif qui la transmet au tympan; le tympan, simple membrane élastique, soumis à des compressions et à des dépressions répète les vibrations de l'air.

2^o) **l'oreille moyenne** : une série de quatre osselets (marteau, enclume, os lenticulaire, étrier) relie le tympan à l'oreille interne.

3^o) **l'oreille interne** : un ensemble de canaux mous (labyrinthe composé du vestibule, des canaux semi-circulaires et du limaçon)

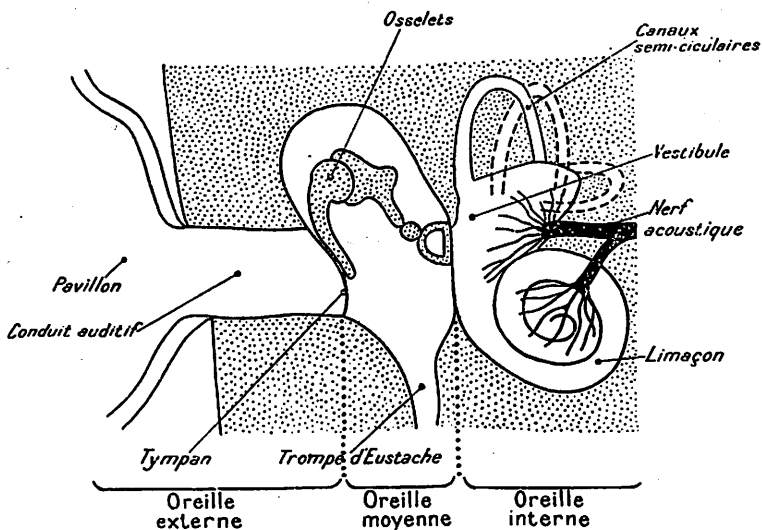


Fig. 418.

reçoit les terminaisons nerveuses, en forme de poils, du nerf auditif; ces canaux baignent dans un liquide appelé endolymphe. Les vibrations du tympan sont transmises à l'endolymphe par l'intermédiaire des osselets: les vibrations de l'endolymphe impressionnent les poils auditifs qui communiquent l'impression reçue au cerveau.

327. RÉFLEXION DES SONS.

Expérience. — Le tic-tac d'une montre disposée au foyer d'une surface parabolique peut être entendu d'un observateur dont l'oreille est placée au foyer d'une seconde surface parabolique située à quelques mètres de la première.

Conclusion. — Les ondes sonores se réfléchissent sur un obstacle comme se réfléchit la lumière sur un miroir.

328. ÉCHO. — La répétition d'un son qui s'est réfléchi sur un obstacle lointain constitue l'écho. Il est aisé de calculer la distance minimum qui doit séparer l'obstacle de la source pour obtenir un écho, sachant que l'oreille ne peut distinguer deux sons brefs successifs que s'ils sont séparés de 0,1 seconde. Pendant ce temps, le son parcourt 34 m (trajet aller et retour). Par conséquent pour qu'il y ait écho, il faut que l'obstacle réfléchissant se trouve à 17 m de la source sonore. L'émission d'une syllabe exige 0,2 seconde : il y aura écho d'une syllabe si l'obstacle réfléchissant se trouve à 34 m de la source sonore. L'écho est dit monosyllabique, dissyllabique,... si une, deux,... syllabes successives reviennent distinctement à l'observateur. Si l'onde sonore est réfléchi par plusieurs obstacles situés à des distances différentes, le son est répété plusieurs fois : l'écho est dit multiple.

Si l'obstacle réfléchissant se trouve à une distance inférieure à 17 m (son bref) ou à 34 m (son articulé) de la source sonore, le son réfléchi empiète sur le son suivant : l'impression devient confuse. L'architecture et l'ornementation des églises, des salles de spectacle sont conditionnées en vue d'une bonne sonorité (acoustique des salles) : on élimine les réflexions défavorables par l'emploi de colonnades, de tentures, de matériaux qui absorbent les vibrations.

EXEMPLE NUMÉRIQUE. — Calculer la vitesse du son à 27° dans l'air et dans l'hydrogène (masse spécifique normale de l'hydrogène : 0,000 09 g/cm³).

SOLUTION. — a) Vitesse du son dans l'air à 27° :

$$V_A = \sqrt{\frac{kp_0}{M_0} \cdot (1 + \alpha T)}; \quad V_A = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 76 \cdot 13,6 \cdot 981}{0,001293} \left(1 + \frac{27}{273}\right)} = 34\,834 \text{ cm/s ou } 348,34 \text{ m/s.}$$

b) En comparant la vitesse dans l'hydrogène à la vitesse dans l'air, nous obtenons

$$\frac{V_H}{V_A} = \sqrt{\frac{M_{0A}}{M_{0H}}}; \quad \frac{V_H}{V_A} = \sqrt{\frac{0,001\,293}{0,000\,09}} = 3,787.$$

et

$$V_H = 348,34 \cdot 3,787 = 1\,329,3 \text{ m/s.}$$

§ 2. QUALITÉS DU SON.

L'impression auditive nous permet d'apprécier trois qualités physiologiques essentielles des sons :

- 1°) l'**intensité** qui distingue un son faible d'un son fort;
- 2°) la **hauteur** qui distingue un son grave d'un son aigu;
- 3°) le **timbre** qui distingue des sons de même intensité et de même hauteur émis par des instruments différents.

1. INTENSITÉ.

329. CAUSE ET LOIS. — L'intensité du son est attribuable à l'énergie avec laquelle les vibrations impressionnent l'organe de perception. Le calcul montre que cette énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude de vibration des particules vibrantes impressionnant l'oreille (n° 300). Toute cause qui fera varier l'amplitude des vibrations perçues fera varier l'intensité du son perçu.

1°) **L'intensité du son est fonction de l'amplitude des vibrations de la source sonore.** — A mesure que le mouvement vibratoire d'une tige d'acier s'amortit, l'amplitude des vibrations des particules d'air qui impressionnent l'oreille diminue : le son faiblit et finit par s'éteindre (fig. 373).

2°) **L'intensité du son est fonction de la distance séparant la source sonore de l'oreille.** — Une onde sonore qui se propage en tous sens dans un milieu indéfini affecte la forme d'une sphère. L'énergie totale émise par la source se répartit sur des surfaces qui sont proportionnelles au carré du rayon de l'onde. L'amplitude des vibrations décroît donc à mesure que l'on s'éloigne de la source sonore. L'intensité du son est, par conséquent, en raison inverse du carré de la distance à la source (Tome I, n° 296).

3°) **L'intensité du son dépend de la nature du milieu de propagation.** — Certains milieux (tenture, air raréfié) diminuent l'amplitude des vibrations et, par conséquent, affaiblissent le son.

330. TUBES ACOUSTIQUES. — La diminution de l'intensité sonore en fonction de la distance est due à la propagation en ondes sphériques. Pour conserver à un son une intensité maximum dans



Fig. 419.

une direction déterminée, on transforme les ondes sphériques en ondes planes. Cette propriété est appliquée dans les instruments suivants :



Fig. 420.

1°) les **tubes acoustiques**, longs tubes cylindriques, qui sont utilisés dans les habitations pour se faire entendre d'une pièce à l'autre;

2°) le **porte-voix** qui canalise les ondes dans une direction et augmente la portée de la voix (fig. 419);

3°) le **cornet acoustique** qui fait converger les ondes vers l'oreille et augmente l'intensité des sons (fig. 420).

331. INTERFÉRENCE DES ONDES SONORES. — Les deux branches d'un diapason en vibration constituent deux sources sonores de même période; l'espace environnant doit présenter des régions d'affaiblissement, des régions de renforcement du son (n° 312). Pour percevoir plus nettement ces variations dans l'intensité des sons, on fait tourner le diapason maintenu verticalement près de l'oreille.

2. HAUTEUR.

332. CAUSE. — Lorsqu'on raccourcit la partie vibrante d'une tige d'acier, la fréquence des vibrations de la tige augmente; le son émis devient de plus en plus aigu. La hauteur ou l'acuité d'un son dépend donc de la fréquence du mouvement vibratoire qui le produit. La fréquence exprime la hauteur du son.

333. MESURE DE LA HAUTEUR. — Pour mesurer la fréquence du mouvement vibratoire d'une source, on emploie diverses méthodes :

1°) **Enregistrement graphique.** — Pour déterminer la fréquence d'une corde vibrante ou d'un diapason, par exemple, on munit l'oscillateur d'un stylet inscripteur qui appuie sur une feuille de papier enfumé recouvrant un cylindre (fig. 421). Ce cylindre est animé à la fois d'un mouvement uniforme de rotation et d'un mouvement régulier de translation suivant l'axe du cylindre. On dénombre les vibrations inscrites sur le cylindre en une seconde.

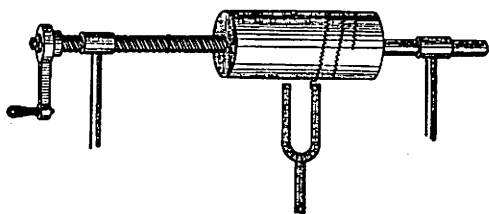


Fig. 421.

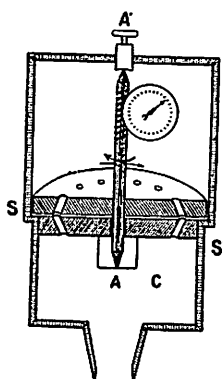


Fig. 422.

2°) **Méthode à l'unisson.** — Cette méthode est basée sur la faculté de percevoir nettement si deux sons ont même hauteur c'est-à-dire s'ils sont à l'unisson. La sirène de Cagnard-Latour comporte un disque S mobile autour d'un axe AA', un disque S' fixe fermant une chambre C reliée à un appareil compresseur d'air (fig. 422). Les disques portent chacun n_1 trous. Les trous du disque mobile sont inclinés en sens inverse des trous du disque fixe. L'air en sortant des trous du disque fixe fait tourner le disque mobile. Chaque fois que les trous supérieurs coïncident avec les trous inférieurs, il se produit un flux d'air qui détermine une compression.

Comme le flux d'air se produit un grand nombre de fois par seconde, il en résulte un son dont la hauteur est fonction de la fréquence des poussées d'air et, par conséquent, de la vitesse de rotation du disque mobile. Par réglage de l'arrivée d'air dans la chambre C, on amène la sirène à émettre un son qui est à l'unisson avec le son à étudier. Si le disque mobile fait n_2 tours à la seconde (déterminés au moyen d'un compteur de tours), la fréquence ν du son émis est :

$$\nu = n_1 n_2.$$

3^o) **Méthode stroboscopique.** — On regarde le corps vibrant à travers un disque percé de trous équidistants et animé d'un mouvement uniforme de rotation (fig. 423). On règle la vitesse du disque de manière que le corps vibrant apparaisse immobile : chaque trou se présente alors devant l'œil au moment où le corps vibrant se trouve dans la même position. La période de vibration est égale au temps nécessaire pour la substitution d'un trou au

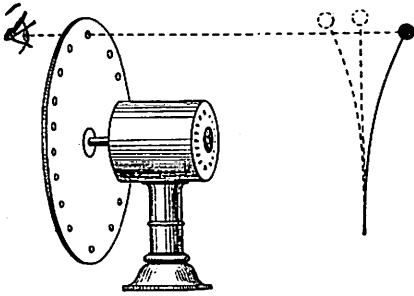


Fig. 423.

précédent. Si le disque a n_1 trous et s'il fait n_2 tours à la seconde, la fréquence ν du son étudié est donc :

précédent. Si le disque a n_1 trous et s'il fait n_2 tours à la seconde, la fréquence ν du son étudié est donc :

$$\nu = n_1 n_2.$$

334. LIMITE D'AUDIBILITÉ. — L'oreille perçoit les sons dont la fréquence est comprise entre 16 cycles (son le plus grave) et 40 000 cycles (son le plus aigu). La sensibilité de l'oreille est maximum pour des sons de fréquence comprise entre 100 et 400 cycles. Cette sensibilité consiste non seulement en la perception des sons très faibles mais encore en la perception de faibles variations de hauteur.

335. ULTRA-SONS. — Si on donne à la source une fréquence de vibrations supérieure à 40 000 cycles, le son émis n'est plus audible : il constitue un ultra-son. Les ultra-sons ne sont guère absorbés par l'eau. Cette propriété particulière fait utiliser les ultra-sons pour la détermination de la profondeur des mers (sonde à ultra-sons).

336. PHÉNOMÈNES DE DOPPLER-FIZEAU. — Lorsque la distance qui sépare l'observateur de la source sonore ne varie pas, la hauteur du son émis reste constante pour l'observateur. Il n'en est plus de même lorsque cette distance varie.

1^o) **Source immobile.** — Supposons que l'observateur se déplace vers la source avec une vitesse uniforme v : il passe de O en O' en une seconde (fig. 424). Dans ces conditions, l'observateur recevra

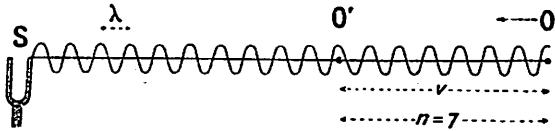


Fig. 424.

pendant cette seconde le nombre ν de vibrations, qu'il aurait reçues s'il était resté au repos, augmenté du nombre n de vibrations, qu'il a rencontrées sur la longueur OO' . La fréquence apparente ν' vaut donc :

$$\nu' = \nu + n.$$

Or, le nombre n d'ondes réparties sur la longueur OO' est

$$n = \frac{v}{\lambda}; \quad n = \frac{v\nu}{V}$$

Donc, la fréquence apparente ν' vaut, en mettant ν en évidence :

$$\nu' = \nu \left(\frac{V + v}{V} \right)$$

Le son perçu par l'observateur est plus aigu.

Si l'observateur s'éloigne de la source avec la vitesse uniforme v , le son qu'il perçoit est plus grave; la fréquence apparente ν' du son perçu s'obtient par le même raisonnement :

$$\nu' = \nu \left(\frac{V - v}{V} \right)$$

Le son émis par une source sonore avec une hauteur évidemment fixée semble subir une diminution brusque de hauteur pour l'observateur passant à bord d'une automobile auprès de la source sonore.

2^o) **Observateur immobile.** — Supposons que la source se déplace avec une vitesse uniforme v (fig. 425). Si la source restait

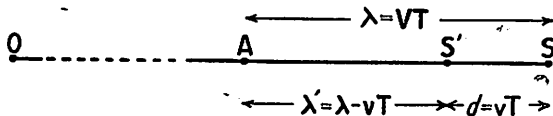


Fig. 425.

en S , le mouvement vibratoire arriverait après une période T en un point A distant du point S d'une longueur d'onde λ . Mais,

la source s'est, pendant la période T , déplacée de S en S' de sorte que le point qui commence la seconde vibration est non S mais S' . La longueur d'onde apparente λ' (distance séparant deux points dans le même état vibratoire) est AS' .

$$\lambda' = \lambda - vT; \quad \lambda' = \frac{V - v}{\nu}$$

Donc, la fréquence apparente ν' du son perçu vaut :

$$\nu' = \nu \frac{V}{V - v}$$

Le son perçu par l'observateur est plus aigu.

Si la source s'éloigne de l'observateur avec la vitesse uniforme v , le son qu'il perçoit est plus grave; la fréquence apparente ν' du son perçu s'obtient par le même raisonnement :

$$\nu' = \nu \frac{V}{V + v}$$

Lors du passage d'une locomotive ou d'une automobile, le son émis par l'avertisseur avec une hauteur évidemment fixée semble subir une diminution brusque de hauteur.

337. RÉSONANCE. — Les phénomènes de résonance sont très fréquents en acoustique :

a) Arrêtons les vibrations d'un diapason vibrant face à un diapason identique : le son persiste; il est émis par le second diapason qui est entré en vibrations.

b) Parlons devant un piano dont les cordes sont découvertes, certaines cordes vibrent et prolongent le son émis.

c) Un diapason tenu en main n'émet qu'un son très faible. Plaçons-le au-dessus de l'ouverture d'une éprouvette cylindrique se remplissant d'eau : le son est considérablement renforcé pour des niveaux nettement déterminés du liquide (fig. 426). La colonne d'air qui surplombe le liquide est le siège d'ondes stationnaires; elle renforce le son du diapason.

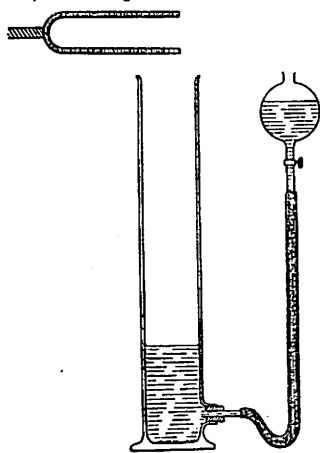


Fig. 426.

338. RÉSONATEURS. — Les résonateurs sont constitués de caisses remplies d'air qui amplifient considé-

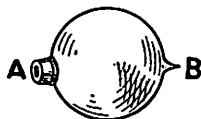


Fig. 427.

ablement, par résonance, les sons de fréquences déterminées.

Les résonateurs de Helmholtz sont des sphères creuses munies d'une large ouverture A et d'un petit tube conique B que l'on introduit dans l'oreille (fig. 427). Chaque résonateur n'entre en résonance que pour un seul son.

La caisse de résonance d'un diapason est accordée sur le son du diapason (fig. 428). Une corde, une membrane n'émettent que des sons très faibles que l'on amplifie par résonance. La caisse de résonance du violon, du piano... doit renforcer, d'une manière aussi égale que possible, tous les sons émis par l'instrument

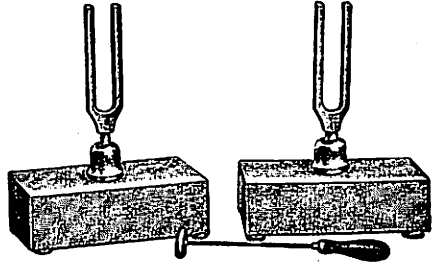


Fig. 428.

339. BATTEMENTS. — Deux diapasons de même hauteur émettent des sons à l'unisson. Collons sur l'un d'eux de petits morceaux de cire : la fréquence de vibration en est légèrement diminuée. Faisons vibrer simultanément les deux diapasons : le son résultant présente des alternatives nettes de renforcement et d'évanouissement que nous avons appelées battements (n° 313). Les phénomènes de battements sont utilisés pour accorder les instruments de musique.

3. TIMBRE.

340. CAUSE. — Le timbre est le caractère qui permet de distinguer deux sons de même hauteur et de même intensité émis par des instruments différents. Helmholtz en a donné, en 1865, la cause physique. La courbe obtenue par l'enregistrement du mouvement vibratoire d'un diapason est une courbe sinusoïdale simple : le son émis par le diapason est un son simple (fig. 421). L'enregistrement graphique des sons émis par les instruments de musique donne, au contraire, des courbes plus complexes (fig. 429) : l'analyse montre que ces sons résultent de la superposition à un son fondamental très intense de sons partiels de fréquences plus élevées. Suivant le nombre, la fréquence, l'intensité des sons partiels superposés au son fondamental, le timbre de la note varie.

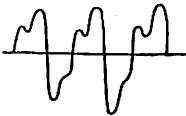


Fig. 429.

Des études de Helmholtz, il résulte :

- 1^o) Les sons des diapasons avec caisse de résonance sont pratiquement dénués de sons partiels : ils sont très doux mais peu musicaux.
- 2^o) Les sons complexes provenant de la superposition de plusieurs sons ne sont agréables à l'oreille que s'ils sont périodiques (cordes de

piano, de violon, etc...). Les sons partiels superposés au son fondamental qui ont des fréquences multiples de la fréquence fondamentale sont dits **harmoniques** du son fondamental. Les harmoniques

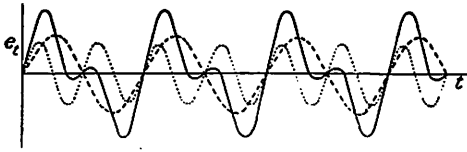


Fig. 430.

(fréquences : 2ν , 3ν ,... 6ν) sont très musicaux (piano, tuyaux d'orgue, cor,...).

4^o) Les sons contenant les harmoniques supérieurs (fréquences : 7ν , 8ν ,...) sont durs et tranchants (tuyaux à anche, hautbois,...).

donnent au son sa musicalité : la vibration complexe a, dans ce cas, la même fréquence que la vibration du son fondamental (fig. 430).

3^o) Les sons contenant les premiers harmoniques

341. SONS COMPLEXES NON PÉRIODIQUES : BRUITS.

— L'enregistrement graphique des vibrations des instruments de percussion (plaques, cymbales, baguettes de bois) donne des courbes non périodiques; ces instruments nous font éprouver des sensations vagues connues sous le nom de **bruits** (explosion, claquement du fouet, etc...).

342. ANALYSE DES SONS. — Analyser un son émis par un instrument, c'est trouver les différents sons qui composent le son complexe émis.

1^o) L'**oreille** d'une personne très entraînée peut trouver les harmoniques du son fondamental.

2^o) Une **série de résonateurs de Helmholtz** permet d'analyser un son : le son est formé des sons émis par les résonateurs qui entrent en résonance. Cette méthode est longue et pénible.

3^o) Le **procédé électrique** est le seul actuellement employé; les vibrations de la membrane d'un microphone devant lequel le son à analyser est émis produisent, dans le courant microphonique, des variations périodiques du courant (n^o 381). L'analyse du courant permet l'analyse du son.

343. VOIX HUMAINE. — Le son est produit par deux lames

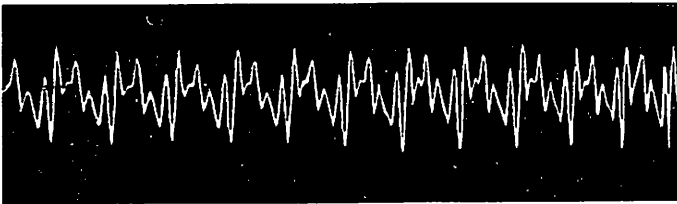


Fig. 431.

membraneuses tendues, les cordes vocales, situées dans le larynx.

Ces membranes sont mises en vibrations plus ou moins rapides par l'air expulsé plus ou moins fortement des poumons. La cavité buccale, suivant la forme qu'elle prend, renforcerait par résonance les sons de certaines fréquences. La figure 431 donne l'enregistrement par procédé électrique du son émis par la voix d'un homme prononçant la lettre *a*.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Une sirène portant 24 trous par disque tourne à raison de 1200 tours par minute. Quelle est la longueur d'onde du son émis lorsque celui-ci se propage dans l'air (vitesse du son dans l'air : 340 m/s) et dans l'eau (vitesse dans l'eau : 1 440 m/s) ?

SOLUTION. — Fréquence du son émis : $\nu = n_1 n_2$; $\nu = 24 \cdot \frac{1\ 200}{60} = 480$.

Longueur d'onde dans l'air : $\lambda = V/\nu$; $\lambda = 340/480 = 0,708$ m.

Longueur d'onde dans l'eau : $\lambda = V/\nu$; $\lambda = 1\ 440/480 = 3$ m.

2. Quelle doit être la vitesse d'une automobile pour que le son émis par la trompe semble, à un observateur fixe, diminuer brusquement d'un sixième de sa hauteur au passage de l'auto ?

SOLUTION. — Désignons par ν la hauteur du son émis par la trompe et par x la vitesse de l'automobile.

Le son perçu lorsque l'automobile s'approche a pour hauteur apparente

$$\nu' = \nu \frac{340}{340 - x}$$

Le son perçu lorsque l'automobile s'éloigne a pour hauteur apparente

$$\nu'' = \nu \frac{340}{340 + x}$$

Nous devons donc avoir :

$$\nu' - \nu'' = \frac{1}{6} \nu'' ; \quad \frac{5}{6} \nu' = \nu''$$

ou

$$\frac{5}{6} \nu \frac{340}{340 - x} = \nu \frac{340}{340 + x}$$

et

$$x = 30,9 \text{ m/s.}$$

§ 3. INSTRUMENTS MUSICAUX.

1. ÉCHELLE MUSICALE.

344. ACCORDS. — On appelle **accord** la superposition de plusieurs sons émis simultanément. L'étude expérimentale a conduit aux conclusions suivantes :

1^o) La musicalité d'un accord dépend uniquement du rapport des fréquences des sons émis. Ainsi, l'audition simultanée des sons de fréquences 300 et 200 produit le même caractère musical que l'audition simultanée des sons de fréquences 450 et 300. Le rapport des fréquences de deux sons est appelé **intervalle**. L'intervalle *I*, qui est toujours exprimé par un nombre supérieur à l'unité, est dans les exemples précités :

$$I = \frac{300}{200} = \frac{3}{2} ; \quad I = \frac{450}{300} = \frac{3}{2}$$

2°) L'accord de deux sons est consonant c'est-à-dire agréable à l'oreille lorsque l'intervalle entre les deux sons s'exprime par un rapport simple. *Exemples* : l'intervalle 1 (unisson), $3/2$ (quinte), $4/3$ (quarte), $5/4$ (tierce majeure), 2 (octave),...

3°) L'accord de deux sons est dissonant c'est-à-dire désagréable à l'oreille lorsque l'intervalle entre les deux sons ne s'exprime pas par un rapport simple.

345. ÉCHELLE MUSICALE. — On appelle gamme musicale une série de huit sons dont les intervalles par rapport au premier son (tonique) sont des rapports simples. Voici les sons ou notes de la gamme avec leur notation courante et leur fréquence relative :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
ν	$\frac{9}{8} \nu$	$\frac{5}{4} \nu$	$\frac{4}{3} \nu$	$\frac{3}{2} \nu$	$\frac{5}{3} \nu$	$\frac{15}{8} \nu$	2ν

Le ut de fréquence 2ν sert de tonique à la gamme suivante. Pour distinguer les gammes successives, on affecte les notes d'un indice numérique indiquant l'ordre de la gamme. La gamme fondamentale a comme indice 1, les gammes suivantes ont comme indices 2, 3,...; les gammes précédentes — 1, — 2,... L'ensemble des gammes forme l'échelle musicale.

ut_1	ré ₁	mi ₁	fa ₁	sol ₁	la ₁	si ₁	ut_2
ν	$\frac{9}{8} \nu$	$\frac{5}{4} \nu$	$\frac{4}{3} \nu$	$\frac{3}{2} \nu$	$\frac{5}{3} \nu$	$\frac{15}{8} \nu$	2ν
ut_2	ré ₂	mi ₂	fa ₂	sol ₂	la ₂	si ₂	ut_3
2ν	$\frac{9}{4} \nu$	$\frac{5}{2} \nu$	$\frac{8}{3} \nu$	3ν	$\frac{10}{3} \nu$	$\frac{15}{4} \nu$	4ν
ut_3	ré ₃	mi ₃	fa ₃	sol ₃	la ₃	si ₃	ut_4
4ν	$\frac{9}{2} \nu$	5ν	$\frac{16}{3} \nu$	6ν	$\frac{20}{3} \nu$	$\frac{15}{2} \nu$	8ν

On peut former un nombre infini d'échelles musicales; il suffit d'attribuer une valeur quelconque à ν pour qu'une échelle musicale soit déterminée. Une commission de musiciens a choisi arbitrairement comme note étalon le la_3 (ton d'orchestre) à laquelle on a fixé la fréquence 435. Toutes les notes de l'échelle musicale des musiciens ont donc leur fréquence fixée : en effet, le la_3 valant les $20/3$ de la

fréquence fondamentale ν du ut_1 , la valeur de la fréquence ν est donc :

$$435 \cdot \frac{3}{20} = 65,25.$$

Une note est diésée si sa fréquence est multipliée par $\frac{25}{24}$; une note est bémolisée si sa fréquence est multipliée par $\frac{24}{25}$.

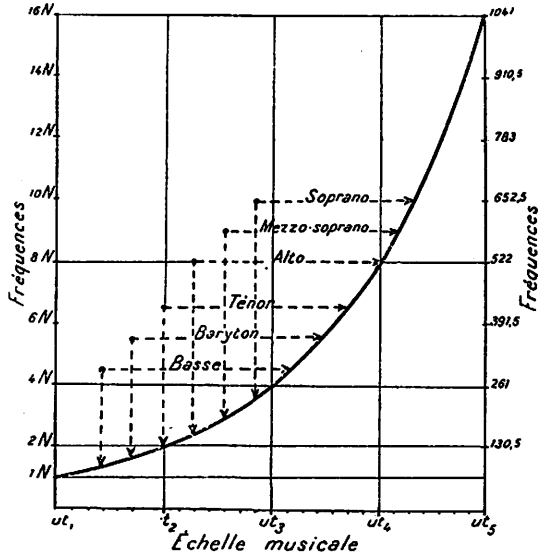


Fig. 432.

Le graphique de la figure 432 indique comment varie la fréquence des notes dans les gammes successives de l'échelle musicale.

346. INTERVALLE ENTRE DEUX NOTES SUCCESSIVES.

— L'intervalle entre deux notes successives se calcule aisément.

Exemple : L'intervalle entre le mi_1 et le fa_1 est égal à : $\frac{4}{3} \nu / \frac{5}{4} \nu = \frac{16}{15}$.

Les intervalles entre les différentes notes sont consignés dans le tableau suivant :

ut	ré	mi	fa	sol	la	si	ut
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

L'intervalle $9/8$ ou ton majeur se retrouve trois fois, l'intervalle $10/9$ ou ton mineur, deux fois; l'intervalle $16/15$ ou demi-ton majeur, deux fois.

347. GAMME CHROMATIQUE OU TEMPÉRÉE. — Une gamme complète comprend les 7 notes fondamentales, leurs dièses et leurs bémols c'est-à-dire un ensemble de 21 notes. Ces 21 sons, qui peuvent être rendus par la voix et par les instruments à sons variables (violon), ne peuvent être exigés des instruments à sons fixes

(piano) dont la construction serait trop compliquée. On a adopté, pour ces derniers instruments, la gamme tempérée; cette gamme est composée de 12 sons présentant entre eux des intervalles égaux appelés demi-tons. Si on désigne par x la valeur de ce demi-ton, il vient :

$$x^{12} = 2 \text{ d'où } x = \sqrt[12]{2} = 1,05946$$

Le demi-ton est légèrement inférieur au demi-ton majeur qui vaut : 1,066 67. La figure 433 représente les touches de la gamme tempérée sur un clavier de piano.

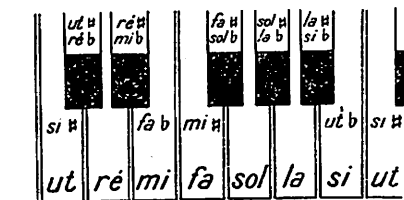


Fig. 433.

348. LIMITES DES FRÉQUENCES ATTEINTES. — La figure 432 indique les limites des notes émises par la voix humaine.

2. CORDES VIBRANTES.

349. SONOMÈTRE. — Cet instrument comporte une ou plusieurs cordes métalliques tendues entre deux chevalets fixés sur une caisse prismatique en bois servant de résonateur (fig. 434). Les cordes sont tendues au moyen d'une vis commandée par une clef. Pour faire vibrer une corde tendue, on l'abandonne à elle-même après l'avoir écartée de sa position d'équilibre (méthode par pincement) ou on l'excite par un léger coup d'archet ou de marteau feutré (méthode par percussion).

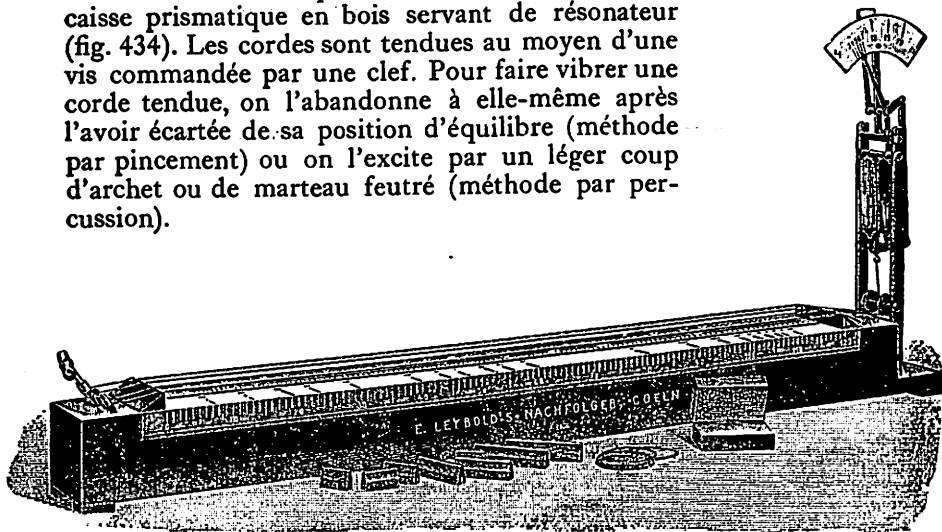


Fig. 434.

350. LOIS DES CORDES VIBRANTES. — Pinçons en son milieu une corde tendue: elle rend un son qui est le plus grave qu'elle puisse émettre : le son fondamental. Remarquons que la corde est le siège d'ondes stationnaires comportant deux nœuds aux extrémités et un ventre au milieu. La longueur l de la corde est donc égale à une demi-longueur d'onde du mouvement vibratoire qui se propage dans la corde (n° 317).

$$l = \frac{\lambda}{2}; \quad l = \frac{VT}{2}; \quad l = \frac{V}{2\nu}.$$

Or, la vitesse de propagation de l'onde dans la corde vaut, F désignant la tension de la corde et m la masse de la corde par centimètre de longueur (1) :

$$V = \sqrt{\frac{F}{m}}.$$

Il résulte donc que la fréquence ν de vibrations de la corde est donnée par :

$$\nu = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{m}}.$$

Le son émis, provenant de la compression et de la dépression de l'air battu par la corde, a évidemment la fréquence de vibration de la corde. Il en résulte que la fréquence du son émis est :

- 1°) inversement proportionnelle à la longueur de la corde;
- 2°) directement proportionnelle à la racine carrée de la tension de la corde;
- 3°) inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse de la corde par centimètre de longueur.

351. VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES.

Tendons sur le sonomètre deux cordes identiques jusqu'à en obtenir l'unisson. Une des deux cordes va nous servir de terme de comparaison.

1°) **Influence de la longueur.** — Glissons un chevalet en dessous d'une des cordes de façon à en limiter la longueur vibrante. Si le chevalet se trouve au milieu de la corde (fig. 435), le son émis est à l'octave aiguë du son émis par la corde de comparaison. En plaçant le chevalet de manière à réduire la longueur vibrante de la corde aux $\frac{8}{9}$, $\frac{4}{5}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$... de la longueur primitive, nous obtenons toutes les notes de la gamme.



Fig. 435.

2°) **Influence de la tension.** — Les deux cordes étant à l'unisson, tendons l'une des cordes de manière que la force exercée sur elle égale quatre fois la

(1) En effet, on démontre que, dans ce cas, le coefficient d'élasticité de la corde est égal à la tension de la corde (n° 325).

force exercée sur l'autre corde (fig. 434). Ces forces se mesurent à l'aide d'un dynamomètre. La note rendue par la corde est à l'octave aiguë de la note rendue par la corde de comparaison.

3°) **Influence de la masse par centimètre de longueur.** — La masse de la corde par centimètre de longueur est fonction du rayon r de la corde et de la masse spécifique M de la substance : $m = M\pi r^2$. En disposant sur le sonomètre des cordes de diamètre ou de substance différents, on vérifie l'influence de la masse par centimètre de longueur de corde.

352. VIBRATIONS COMPLEXES D'UNE CORDE. — Lorsqu'on pince la corde en un endroit quelconque, elle émet des sons partiels qui se superposent au son fondamental. En effet, le régime des ondes stationnaires permet l'existence de 2, 3, 4, ... ($k + 1$) nœuds; la longueur l de la corde est égale à $\lambda/2, 2\lambda/2, 3\lambda/2, \dots, k\lambda/2$ du mouvement vibratoire se propageant dans la corde. La fréquence ν des vibrations de la corde est donnée par

$$\nu = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{m}}$$

k pouvant être un nombre égal à 1 (son fondamental), 2, 3, ... k suivant que le nombre de nœuds est 2, 3, 4, ... ($k + 1$). On remarquera que les sons partiels sont tous des harmoniques du son fondamental. Le nombre et l'intensité des harmoniques dépendent du mode d'attaque de la corde (percussion, pincement) et du point de la corde attaqué.

353. APPLICATIONS. — Dans le piano, les cordes tendues à 40 kg' sont frappées par des marteaux feutrés vers le septième de leur longueur pour éviter l'harmonique 7. Les cordes donnant les notes aiguës sont fines et courtes, les cordes donnant les notes graves sont grosses, longues et souvent alourdies (cordes filées). L'instrument est accordé par réglage de la tension.

Dans le violon, les cordes en boyau de chat sont de grosseurs différentes. A l'aide des doigts, on modifie à volonté la longueur utile de la corde.

3. TIGES VIBRANTES.

354. TIGES VIBRANTES. — Des tiges rigides et élastiques, frottées avec les doigts enduits de colophane, vibrent longitudinalement en émettant un son aigu très pur. Le **triangle** donne des harmoniques très élevés du son fondamental. Le **diapason** est une tige courbée fixée en son milieu : en vibration, il présente un nœud au point de fixation et deux ventres aux extrémités. Le son rendu par le diapason est très pur.

4. TUYAUX SONORES.

Les tuyaux sonores sont constitués de tubes remplis d'air; ils émettent un son lorsqu'ils sont le siège d'ondes stationnaires. Selon que les deux extrémités sont ouvertes ou que l'une des deux extrémités est fermée, le tuyau est dit ouvert ou fermé.

355. LOIS DES TUYAUX FERMÉS.

Reprenons l'expérience décrite au n° 337 (fig. 426). Si la hauteur du liquide dans l'éprouvette est telle qu'il s'y établit un régime d'ondes stationnaires, l'éprouvette devient une source sonore en résonance avec le diapason. En effet, arrêtons le mouvement vibratoire du diapason en le touchant du doigt; le son se prolonge quelque temps : il est émis par l'air de l'éprouvette.

Le régime d'ondes stationnaires le plus simple qui puisse s'établir dans un tuyau fermé comporte un nœud à l'extrémité fermée et un ventre à l'extrémité ouverte. La longueur l du tuyau fermé est donc égale à un quart de la longueur d'onde du mouvement vibratoire qui se propage dans le tuyau (fig. 436 a) (n° 317)

$$l = \frac{\lambda}{4}; \quad l = \frac{VT}{4}; \quad l = \frac{V}{4\nu}.$$

La fréquence du son fondamental émis par le tuyau est donc, V désignant la vitesse du son dans l'air :

$$\nu = \frac{V}{4l}$$

Les sons partiels qui accompagnent le son fondamental correspondent à des régimes d'ondes stationnaires comprenant 2, 3, 4, ... nœuds (fig. 436 b, c). La longueur l du tuyau vaut $3\lambda/4, 5\lambda/4, 7\lambda/4, \dots$; les fréquences des sons partiels sont $3\nu, 5\nu, 7\nu, \dots$. Les sons partiels sont donc constitués par les harmoniques impairs du son fondamental.

356. LOIS DES TUYAUX OUVERTS.

Répetons l'expérience du n° 337 avec un tuyau ouvert aux deux extrémités et formé de deux parties coulissant l'une dans l'autre. Nous observons qu'il y a résonance lorsque la longueur du tuyau ouvert est double de la longueur du tuyau fermé.

Ce fait se comprend : l'onde qui se propage dans le tuyau se réfléchit à l'extrémité du tuyau à cause de

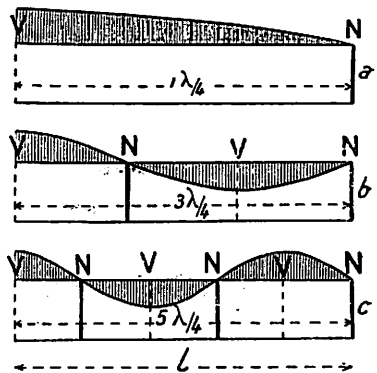


Fig. 436.

l'inertie de la grande masse d'air extérieur. Cependant cette masse d'air agit à la façon d'un obstacle mobile : il s'y forme donc un ventre. Le régime d'ondes stationnaires le plus simple qui puisse s'établir dans un tuyau ouvert comporte deux ventres aux extrémités et un nœud au milieu (fig. 437 a). La longueur l du tuyau ouvert est égale à une demi-longueur d'onde du mouvement vibratoire qui se propage dans le tuyau.

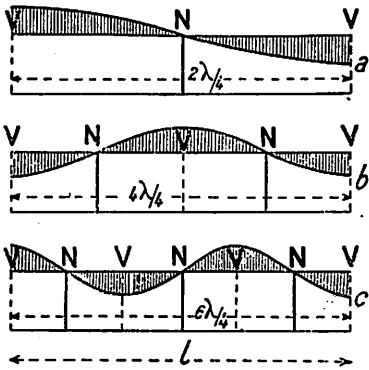


Fig. 437.

$$l = \frac{\lambda}{2}; \quad l = \frac{VT}{2}; \quad l = \frac{V}{2\nu}$$

La fréquence du son fondamental du tuyau est donc :

$$\nu = \frac{V}{2l}$$

Les sons partiels qui accompagnent le son fondamental correspondent à des régimes d'ondes stationnaires comprenant 3, 4, 5, ... ventres (fig. 437 b, c). La longueur l du tuyau vaut $2\lambda/2, 3\lambda/2, 4\lambda/2, \dots$; les fréquences des sons partiels sont $2\nu, 3\nu, 4\nu, \dots$. Les sons partiels sont donc constitués par tous les harmoniques du son fondamental.

357. MODES D'EXCITATION DES TUYAUX. — L'air des tuyaux sonores est mis en vibration par une soufflerie ou par la bouche.



Fig. 438.

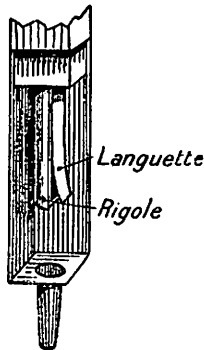


Fig. 439.

1^o) Dans l'embouchure de flûte (fig. 438), l'air soufflé dans

le canal C sort par une fente étroite F et vient buter contre un biseau B taillé dans la paroi du tuyau au niveau de la lumière F. Contrairement à ce qu'on avait cru jusqu'à ces derniers temps, le biseau ne vibre pas. Au niveau du biseau, l'air pénètre dans le tuyau ou en sort par jets périodiques : la périodicité des jets est commandée par les ondes stationnaires elles-mêmes qui se créent dans le tuyau.

2^o) Dans l'**embouchure à anche** (fig. 439), une lame élastique (languette) s'applique presque complètement sur une pièce demi-cylindrique (rigole). L'air insufflé fait vibrer la languette et pénètre par saccades dans le tuyau.

358. VÉRIFICATION EXPÉRIMENTALE DES LOIS DES TUYAUX.

Les lois des tuyaux sont vérifiées au moyen de tuyaux d'orgue adaptés sur une soufflerie. La longueur du tuyau sonore est, à peu de chose près, la distance comprise entre la lumière et l'extrémité supérieure du tuyau. Au niveau de la lumière existe un ventre. La vérification des lois consiste à mettre en relief les positions des ventres et des nœuds. A cet effet, on descend dans le tuyau une petite nacelle en papier saupoudré de sable très fin : le sable reste immobile aux nœuds, s'agite aux ventres.

Remarquons : 1^o) qu'un piston descendu dans le tuyau n'altère pas la



Fig. 440.

hauteur du son émis par le tuyau s'il se trouve au niveau d'un nœud (fig. 440); 2^o) qu'une ouverture pratiquée dans la paroi du tuyau ne modifie pas la note émise si elle est pratiquée au niveau d'un ventre; 3^o) qu'une ouverture faite dans la paroi du tuyau modifie la note émise si elle est faite au niveau d'un nœud car à l'ouverture se produit un ventre; 4^o) que la transformation d'un tuyau fermé en tuyau ouvert fait rendre au tuyau un son à l'octave aiguë du son émis par le tuyau fermé; 5^o) que l'insufflation dans le tuyau ouvert d'un gaz plus dense que l'air rend le son plus grave; d'un gaz plus léger, le son plus aigu.

359. APPLICATIONS. — Les instruments de musique dits instruments à vent sont des applications des tuyaux sonores. Dans les orgues, chaque tuyau émet le son fondamental privé d'harmoniques : le timbre est obtenu en émettant simultanément une série de sons de fréquences multiples l'un de l'autre. Dans les instruments à vent comprenant un seul tuyau sonore, les diverses notes sont obtenues en débouchant des orifices pratiqués en différents points du tuyau (clarinette) ou en modifiant la longueur du tuyau (trombone à coulisse) ou bien encore en démasquant des tuyaux auxiliaires au moyen de pistons (cornet à pistons). Remarquons que pour certains instruments (cor, clairon) on n'utilise qu'une note et ses différents harmoniques. Dans les instruments en cuivre, ce sont les lèvres de l'exécutant qui, s'appuyant sur l'embouchure, forment l'anche vibrante.

5. MEMBRANES VIBRANTES.

360. MEMBRANES VIBRANTES. — Les membranes en papier, en baudruche,... tendues sur cadre fixe peuvent exécuter des vibrations que l'on met en relief en saupoudrant les membranes de lycopode. En général, l'amortissement des vibrations des membranes est très rapide : la zone de résonance est donc très grande. On fabrique des membranes sans période propre de vibration c'est-à-dire des membranes susceptibles de vibrer pour toutes les vibrations qu'elles reçoivent : ces membranes sont en usage dans les téléphones, microphones, haut-parleurs, etc... Les tambours, les tymbales sont constitués de membranes en peau tendues sur une caisse de résonance.

361. PHONOGRAPHE. — Le phonographe inventé par Edison, perfectionné par Bell, est un appareil qui reproduit des sons enregistrés.

Enregistrement. — Les sons à enregistrer pénètrent dans un cornet, font vibrer une membrane en acier pourvue d'un stylet qui trace un sillon dans un disque de cire molle animé d'un mouvement de rotation. Le stylet trace une hélice sur le disque. Selon le mode d'enregistrement, le sillon tracé a une profondeur variable, proportionnelle aux déplacements de la membrane ou bien le sillon tracé a une profondeur constante mais présente une forme sinueuse.

Reproduction des disques. — On fabrique par galvanoplastie un moule en cuivre qui reproduit les moindres détails du disque enregistré. Par pression à chaud contre ce moule d'une matière plastique, on obtient les disques que l'on trouve dans le commerce.

Reproduction des sons. — La reproduction des sons enregistrés se fait au moyen d'un appareil semblable à l'appareil enregistreur : le stylet tranchant de ce dernier est remplacé par une pointe mousse. Le mouvement du disque imprime à cette pointe et à la membrane qui lui est solidaire les vibrations enregistrées.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. La corde du violoncelle, dont le son fondamental est le fa_1 pour une longueur utile de 70 cm, pèse 1,5 gramme au mètre. Calculer : a) la tension de la corde; b) la section d'une corde d'acier (masse spécifique : 7,8 g/cm³) qui pour la même longueur et la même tension rendrait le la_1 ; c) la vitesse de propagation de la déformation transversale dans la corde d'acier. On sait que la fréquence du la_3 est 435.

SOLUTION. — a) Fréquence du fa_1 :

$$fa_1 = \frac{4}{3} \nu; \quad fa_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{3}{20} \cdot 435 = 87.$$

Tension de la corde :

$$F = 4l^2\nu^2m; \quad F = 4 \cdot 70^2 \cdot 87^2 \cdot 0,015 = 2\,225\,286 \text{ dyn} \neq 2,27 \text{ kg}'.$$

b) Fréquence du la_1 :

$$la_1 = \frac{5}{3} \nu; \quad la_1 = \frac{5}{3} \cdot \frac{3}{20} \cdot 435 \neq 109.$$

Masse de la corde par centimètre :

$$m = \frac{F}{4l^2v^2}; \quad m = \frac{2\ 225\ 286}{4 \cdot 70^2 \cdot 109^2} = 0,009\ 556\ \text{g.}$$

Section de la corde : $\frac{0,009\ 556}{7,8} = 0,00122\ \text{cm}^2.$

c) Vitesse de propagation de la déformation :

$$V = 2lv; \quad V = 2 \cdot 70 \cdot 109 = 15\ 260\ \text{cm/s.}$$

2. La hauteur du diapason en fonte donnant le *lag* (435 vibrations) est de 25 cm. On demande la vitesse de propagation de la déformation dans la fonte.

SOLUTION. — On sait qu'il se produit un ventre aux extrémités du diapason et un nœud, au milieu du diapason.

On a donc :

$$l = \frac{\lambda}{4}; \quad l = \frac{V}{4v}; \quad V = 4vl; \quad V = 4 \cdot 435 \cdot 25 = 43\ 500\ \text{cm/s ou } 435\ \text{m/s.}$$

3. Un tuyau d'orgue, rempli d'air, émet le son fondamental ut₃. On demande : 1°) la longueur du tuyau d'orgue; 2°) la note émise par le tuyau lorsqu'on en ferme l'extrémité supérieure; 3°) la note émise par le tuyau si on perce une ouverture aux $\frac{3}{4}$ de sa hauteur; 4°) la note émise par le tuyau rempli d'anhydride carbonique. (Vitesse du son dans l'air : 340 m/s; densité de l'anhydride carbonique : 1,53).

SOLUTION. — 1°) Fréquence du ut₃ : $v = 65,25 \cdot 4 = 261.$

Longueur du tuyau d'orgue :

$$l = \frac{2\lambda}{4}; \quad l = \frac{2V}{4v}; \quad l = \frac{2 \cdot 340}{4 \cdot 261} = 0,65\ \text{m.}$$

2°) Puisqu'à l'extrémité fermée se produit un nœud, on a :

$$l = \frac{\lambda}{4}; \quad l = \frac{V}{4v}; \quad v' = \frac{V}{4l}; \quad v' = \frac{v}{2}; \quad v' = \frac{261}{2} = 130,5.$$

La note émise est le ut₂.

3°) Puisqu'au niveau de l'ouverture se produit un ventre, on a :

$$\frac{3}{4}l = \frac{2V}{4v''}; \quad v'' = \frac{8V}{12l}; \quad v'' = \frac{4}{3}v; \quad v'' = \frac{261 \cdot 4}{3} = 348.$$

La note émise est le fa₃.

4°) Vitesse du son dans l'anhydride carbonique :

$$\frac{V_{\text{co}_2}}{V_{\text{air}}} = \sqrt{\frac{M_{\text{co}_2}}{M_{\text{air}}}}; \quad \frac{V_{\text{co}_2}}{340} = \sqrt{1,53}; \quad V_{\text{co}_2} = 1,24\ V_{\text{air}}$$

Fréquence de la note émise par le tuyau d'orgue :

$$l = \frac{2\lambda}{4}; \quad l = \frac{2V_{\text{co}_2}}{4v''''}; \quad v'''' = \frac{2V_{\text{co}_2}}{4l}; \quad v'''' = 1,24\ v = 323,6.$$

La note émise est très voisine du mi₄.

4. Un tuyau rempli de gaz est fermé à une extrémité par un piston mobile, à l'autre par un piston fixe portant une tige de verre. Lorsqu'on frotte la tige de verre avec de la colophane, il se produit dans le tuyau des ondes stationnaires pour des positions déterminées du piston mobile. Ces ondes stationnaires sont mises en évidence par le rassemblement en forme de petits tas au niveau des nœuds de la poudre de lycopode placée dans le tuyau. Si le tuyau est rempli d'air, la distance séparant deux petits tas consécutifs est de 5 cm ; si le tuyau est rempli d'hydrogène, la distance séparant ces deux petits tas consécutifs est de 19 cm. Déduire : 1°) la fréquence du mouvement vibratoire dans la tige de verre; 2°) la vitesse du son dans l'hydrogène (vitesse du son dans l'air : 340 m/s).

SOLUTION. — 1°) Les petits tas de lycopode indiquent les positions des nœuds de vibration.

Longueur d'onde dans l'air : $\lambda = 10\ \text{cm.}$

Fréquence du mouvement vibratoire dans la tige de verre :

$$r = \frac{V}{\lambda} ; r = \frac{34\,000}{10} = 3400.$$

2°) Longueur d'onde dans l'hydrogène : $\lambda = 38$ cm.

Vitesse de propagation du son dans l'hydrogène :

$$V = r\lambda ; V = 3\,400 \cdot 38 = 129\,200 \text{ cm/s ou } 1\,292 \text{ m/s.}$$

EXERCICES NUMÉRIQUES

1. Entre l'éclair et le coup de tonnerre s'écoule un temps de 6 secondes. A quelle distance se trouve le nuage orageux? On considère que la transmission de la lumière est instantanée (Vitesse du son : 340 m/s). R : 2040 m.

2. Calculer la vitesse du son dans la région atmosphérique où la pression est de 50 cm de mercure et la température — 20° C. Dans l'air, à 0° C, la vitesse du son est 332 m/s. Quelle est dans cette région atmosphérique la longueur d'onde du son dont la fréquence est 435? R : $V = 318,72$ m; $\lambda = 0,733$ m.

3. Un ouvrier frappe l'extrémité d'une canalisation en fonte longue de 951,25 m. A l'autre extrémité du tuyau, un observateur note un retard de 2,5 s du son transmis dans l'air du tuyau sur celui transmis par la fonte (expérience de Biot). a) Déduire la vitesse du son dans la fonte (vitesse du son dans l'air : 340 m/s). b) Déduire le rapport des vitesses du son dans le gaz et dans l'air sachant que lorsque le tuyau est rempli de gaz d'éclairage le retard est de 2 s. R : a) 3194 m/s; b) 1,22.

4. Une source sonore se trouve sur le segment de droite abaissé perpendiculairement d'un observateur à une surface réfléchissante. La source sonore se trouve à 500 m de l'observateur et émet un son bref. L'observateur perçoit un premier son (son direct) suivi d'un second son (écho) à un intervalle de 10 s. Calculer la distance qui sépare l'observateur de la surface réfléchissante (vitesse du son : 340 m/s). R : 1700 m.

5. Une sirène présentant 40 trous est à l'unisson avec une note émise par un diapason lorsque sa vitesse de rotation est 391,5 tours/minute. Déduire : a) la fréquence de la note émise; b) la note émise; c) la longueur d'onde du son dans l'air (vitesse du son : 340 m/s); d) les six premiers harmoniques de la note émise. R : a) 261; b) ut_3 ; c) 130 cm; d) $ut_4, ut_5, sol_5, ut_6, mi_6, sol_6$.

6. Deux diapasons donnent le la_3 ($r = 435$). On surcharge l'un de ces diapasons. Lorsqu'ils vibrent simultanément, il se produit un battement où on perçoit un renforcement du son par seconde. Déterminer l'intervalle des deux notes émises. R : 435/434.

7. On observe à l'aide du stroboscope une corde tendue entre deux points fixes distants de 60 cm. La corde émettant le son fondamental paraît immobile lorsque le stroboscope qui comporte 24 trous tourne à raison de 300 tours/minute. Calculer : a) la fréquence du son émis; b) la vitesse de propagation de la déformation dans la corde. R : a) $r = 120$; b) $V = 144$ m/s.

8. Avec les données de l'exercice précédent, on demande ce que l'on verrait si la vitesse de rotation du stroboscope passait régulièrement de 310 tours/minute à 290 tours/minute. R : au régime de 310 tours/minute, fréquence apparente de la corde : 4; au régime de 290 tours/minute, fréquence apparente de la corde : 4; lors de la variation de vitesse, l'observateur voit la corde diminuer de fréquence de vibration, rester immobile et enfin augmenter de fréquence de vibration.

9. Une source sonore A, placée sur une automobile, émet un son dont la fréquence est 522. Un observateur B, placé sur une automobile, perçoit le son émis. a) Indiquer la vitesse et le sens du déplacement de la source sachant que l'observateur B, étant au repos, perçoit la note si_3 . b) Indiquer la vitesse et le sens du déplacement de la source, sachant que l'observateur B s'approchant de la source A à la vitesse de 60 km/h perçoit la note $ré_4$. c) Quelle sera, dans ce dernier cas, la variation de hauteur du son perçu lorsque les deux

automobiles se croiseront? (Vitesse du son dans l'air : 340 m/s). R : a) éloignement de l'observateur : $V = 76,5$ km/h; b) approche de l'observateur : $V = 93$ km/h; c) $l = 9/7$.

10. Un diapason en vibration de fréquence 68 tombe sans vitesse initiale dans un puits de mine profond de 1125 m. a) Ecrire l'équation donnant la hauteur du son perçu en fonction du temps par un observateur posté au sommet du puits. b) Ecrire la même équation en prenant pour paramètre la profondeur h atteinte par le diapason. c) Quelle devrait être la profondeur atteinte par le diapason pour que le son ne soit plus audible (limite de perception : 20 vibrations par seconde)? d) Quelles notes percevra un observateur posté au fond du puits? (On fera abstraction de la résistance de l'air et on prendra pour g la valeur : 10 m/s^2 et pour la vitesse du son la valeur : 340 m/s). R : a) $\nu' = 68 - 2t$; b) $\nu' = 69 - 0,9 \sqrt{h}$; c) 2840 m; d) du ut_1 au sol_1 .

11. Un diapason donnant le la_3 ($\nu = 435$) vibre devant un tuyau plein d'air qui se remplit progressivement d'eau. a) Calculer les niveaux de l'eau pour lesquels il y a résonance. b) Déterminer la vitesse de propagation du son dans le gaz d'éclairage sachant qu'il y a résonance pour des niveaux d'eau situés à 84 cm et à 28 cm lorsque le tuyau est rempli de gaz d'éclairage. R : a) 97,5 cm; 58,5 cm; 19,5 cm; b) 487 m/s.

12. Une corde homogène pèse 3 grammes par mètre; on demande la longueur à donner à la corde pour que, tendue à 50 kg', elle rende le ut_3 comme son fondamental. R : 78 cm.

13. Ecrire l'équation qui donne la fréquence du son émis par une corde de cuivre (masse spécifique : $8,8 \text{ g/cm}^3$) d'un mètre de longueur tendue à 2,5 kg' en fonction du diamètre de la corde. R : $3 \frac{k}{d}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$).

14. Une corde AB de 80 cm de longueur, tendue par un poids constant, rend le son fondamental ut_3 . On place un chevalet en un point C distant du point A de 20 cm. Les deux parties AC et CB peuvent vibrer séparément. a) Calculer les fréquences émises par chacune des parties de la corde. b) Comment varient les fréquences ν_1 et ν_2 de chacune des parties de la corde lorsqu'on fait varier la longueur l de AC? c) Chercher la relation qui existe entre les fréquences ν_1 et ν_2 des parties de la corde et la fréquence ν (261) de la corde entière. R : a) $\nu_1 = 1044$; $\nu_2 = 348$. b) $\nu_1 = \frac{20880}{l}$; $\nu_2 = \frac{20880}{80-l}$;

c) $\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2} = \frac{1}{\nu}$.

15. Deux tuyaux sonores ouverts, identiques, remplis d'air à la température de 0°C vibrent à l'unisson en donnant le ut_3 comme son fondamental. On veut produire des battements à raison de 60 par minute. On demande : a) la température à laquelle il faut porter un des tuyaux; b) la longueur des tuyaux. (Vitesse du son dans l'air à 0°C : 332 m/s). R : a) $2^\circ 18'$; b) 63,6 cm

16. Deux tubes sonores ouverts émettent le sol_3 lorsqu'ils sont remplis d'air (Vitesse du son : 340 m/s). Si l'un de ces tuyaux est alimenté d'hydrogène et l'autre d'oxygène, le son émis par le premier est identique au son émis par le second lorsqu'on descend dans ce dernier un piston qui ferme le tuyau de façon à limiter sa hauteur utile à $1/8$ de sa hauteur. Déterminer : a) la hauteur des tuyaux; b) le rapport des vitesses de propagation du son dans l'hydrogène et dans l'oxygène; c) la vitesse du son dans l'hydrogène sachant que la note émise par le tube d'hydrogène est le sol . R : a) 43,5 cm; b) 4; c) 1362 m/s.

LECTURE

MICROSILLON ET MAGNÉTOPHONE

L'enregistrement et la reproduction des sons ont acquis une importance considérable dans les arts (musique, cinéma), dans la vie sociale (discours), dans le commerce (dictaphone). Ils sont réalisés par voie mécanique (phonographe), par voie magnétique (magnétophone), par voie optique (film parlant).

Microsillon. — La première machine parlante fut construite en 1878 par l'américain Edison (fig. 441) : l'enregistreur était constitué d'une embouchure de téléphone dont la membrane métallique portait un stylet terminé par une pointe d'agate (pierre très dure). Les vibrations de la membrane métallique produites par les ondes sonores s'inscrivent en profondeur dans une feuille d'étain enroulée sur un cylindre qu'on animait à la main d'un mouvement hélicoïdal. Les déformations produites dans la feuille d'étain formaient une rigole hélicoïdale dont les variations de profondeur reflétaient les vibrations de la membrane métallique. Pour reproduire les sons enregistrés, on faisait repasser la pointe d'agate dans la rainure hélicoïdale de la feuille d'étain à laquelle on imprimait la même vitesse qu'à l'enregistrement : la pointe qui passait dans les creux et les

reliefs de la rigole hélicoïdale faisait vibrer une lame métallique placée dans le fond d'un tronc de cône creux.

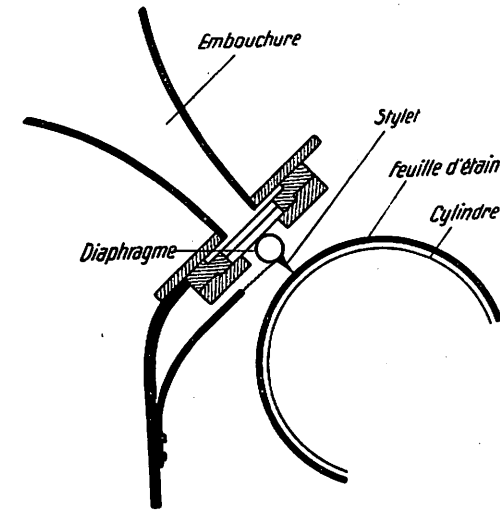


Fig. 441.
Machine parlante d'Edison.

Vers 1888, l'américain Berliner eut l'idée d'enregistrer les sons sur un disque tournant autour d'un axe vertical (fig. 442) : le sillon dont la profondeur est constante présente des sinuosités latérales qui lui donnent une certaine largeur. Grâce à ce mode d'enregistrement, on pouvait enregistrer les sons sur les deux faces du disque. Le même inventeur imagina d'effectuer un moulage du disque avec une matière à base de gomme laque afin de pouvoir reproduire l'enregistrement original en plusieurs exemplaires.

Bientôt, on adapte à l'appareil un pavillon évasé, puis un moteur actionné par ressort de manière à régulariser l'entraînement du disque : le phonographe était inventé. Ce phonographe n'était guère qu'un jouet : il manquait d'intensité sonore, reproduisait peu fidèlement les sons émis...

Mais l'introduction d'un amplificateur électrique et d'un lecteur électrique eurent des conséquences heureuses. Dès 1925, les perfectionnements de la T.S.F. amenèrent des perfectionnements du phonographe : les sons sont fidèlement enregistrés et fidèlement reproduits. A l'enregistrement, les ondes sonores reçues dans un microphone modulent un courant électrique; le courant électrique modulé passe dans l'enroulement d'un électro-aimant dont l'armature est munie d'un stylet; le stylet grave les empreintes dans le

disque (fig. 443). A la reproduction, les vibrations d'une membrane microphonique engendrées par les vibrations du stylet se déplaçant sur le disque modulent un courant électrique; la membrane du haut-parleur rend des sons enregistrés. Jouet d'enfant à l'aube du XX^e siècle, le phonographe connaît un succès croissant auprès des mélomanes.

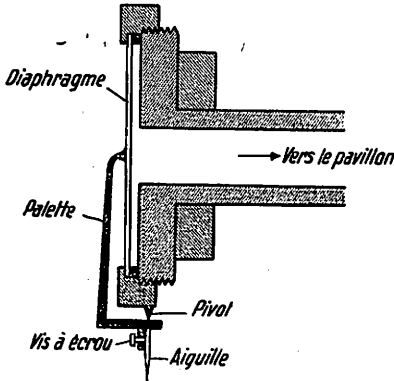


Fig. 442.

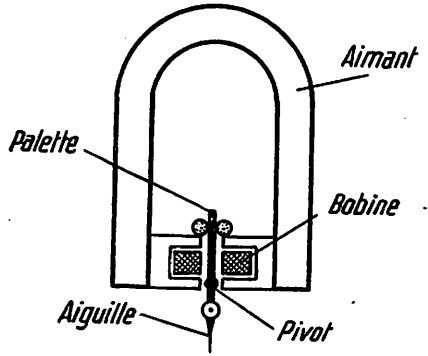


Fig. 443.

Depuis 1950, on remplace, dans la fabrication des disques, les résines naturelles (gomme-laque, copal...) par des résines synthétiques (vinylite...) : les résines synthétiques ont sur les résines naturelles l'avantage d'être moins fragiles, plus légères, plus lisses... Le disque standard laisse percevoir un bruit de fond assez appréciable : la surface de la résine naturelle dont il est constitué est granuleuse. Le disque microsillon ne laisse percevoir qu'un bruit de fond très léger : la surface de la résine synthétique dont il est constitué est lisse. D'autre part, l'amplitude des sinuosités du sillon étant proportionnelle à l'intensité du son, les spires doivent être suffisamment séparées les unes des autres puisqu'on doit éviter tout chevauchement de deux spires voisines pour ne pas nuire à la qualité de l'audition. Grâce aux résines synthétiques, la distance entre les spires a pu être fortement réduite : un son fort peut être enregistré sur les plaques en résines synthétiques avec une amplitude faible parce qu'il est possible, eu égard à l'absence de bruit de fond, d'amplifier à volonté lors de la reproduction. Pour une surface déterminée, on inscrit plus de spires sur les résines synthétiques que sur les résines naturelles : le nombre de spires par centimètre est de 28 à 39 pour les disques standard, de 80 à 100 pour les disques microsillon. En outre, les vitesses de rotation des disques sont différentes : de 78 tours par minute pour un disque standard, elle est de 45 tours par minute et de 33 tours par minute pour les disques microsillon. Tout en améliorant la qualité de l'audition et en diminuant l'usure de la pointe liseuse, on est parvenu à prolonger considérablement la durée de l'audition : de 4 ½ minutes par face d'un disque standard (diamètre : 30 cm), elle est de 30 minutes par face d'un disque microsillon de même diamètre.

Magnétophone. — Le magnétophone comporte une substance magnétique, en forme de fil ou de ruban, qui défile à vitesse constante devant une tête d'enregistrement (fig. 444) : chaque point de la substance magnétique conserve une aimantation rémanente proportionnelle à l'intensité du champ magnétique à l'instant de son passage devant la tête d'enregistrement (n° 251). La tête d'enregistrement est constituée d'un électro-aimant torique sur lequel est bobiné un enroulement parcouru par le courant microphonique à enregistrer (n° 380). L'électro-aimant présente deux entrefers : l'entrefer arrière,

courant pour laquelle le circuit est en résonance vaut :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}; \quad \omega^2 = \frac{1}{LC}; \quad \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{1}{LC}$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Cette relation est à la base de la T. S. F.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un courant alternatif sinusoïdal de fréquence 50 périodes par seconde alimente un radiateur électrique dont la résistance ohmique est de 65 Ω et dont le coefficient de self est négligeable. Le radiateur fournit 3744 cal par minute. On demande : a) la tension efficace U_e du courant; b) la tension maximum U_m du courant; c) la puissance W du courant; d) l'équation de l'intensité du courant en fonction du temps.

SOLUTION. — a) Effet Joule :

$$Q = 0,24 I^2 R t; \quad 3744 \text{ cal} = 0,24 \cdot I^2 \cdot 65 \cdot 60; \quad I = 2 \text{ A.}$$

L'intensité efficace I du courant étant de 2 A, on obtient :

$$\text{Tension efficace : } U_e = I_e R; \quad U_e = 2 \cdot 65 = 130 \text{ V.}$$

$$\text{b) Tension maximum : } U_m = U_e \sqrt{2}; \quad U_m = 185,7 \text{ V.}$$

L'isolement de la ligne doit être calculé pour la tension de 185,7 V.

$$\text{c) Puissance : } W = U_e I_e; \quad W = 130 \cdot 2 = 260 \text{ W.}$$

d) Equation de l'intensité du courant en fonction du temps :

$$I_t = I_m \sin \frac{2\pi t}{T}; \quad I_m = 2 \sqrt{2} = 2,82 \text{ A.}$$

$$I_t = 2,82 \sin (2\pi \cdot 50 \cdot t) = 2,82 \sin 100 \pi t.$$

2. On introduit en série avec le radiateur de l'exercice précédent une bobine dont la résistance ohmique est de 2 Ω et dont le coefficient de self-induction est de 0,5 H. Calculer l'intensité efficace et la puissance du courant produit dans ce circuit a) par un courant continu de 130 V de tension; b) par un courant alternatif de même tension efficace et de fréquence 50; c) par un courant alternatif de même tension efficace et de fréquence 500.

SOLUTION. — a) Courant continu :

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = \frac{130}{67} = 1,94 \text{ A.}$$

$$W = UI; \quad W = 130 \cdot 1,94 = 252,2 \text{ W.}$$

b) Courant alternatif de fréquence 50 :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}; \quad Z = \sqrt{67^2 + 0,5^2 \cdot 4\pi^2 \cdot 50^2} = 170,6 \Omega.$$

$$I_e = \frac{U_e}{R}; \quad I_e = \frac{130}{170,6} = 0,76 \text{ A.}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega}{R}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{0,5 \cdot 2\pi \cdot 50}{67} = 2,34;$$

$$\varphi = 66^\circ 52'; \quad \cos \varphi = 0,393.$$

$$W = U_e I_e \cos \varphi; \quad W = 130 \cdot 0,76 \cdot 0,393 = 38,8 \text{ W.}$$

c) Courant alternatif de fréquence 500 :

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}; \quad Z = \sqrt{67^2 + 0,5^2 \cdot 4\pi^2 \cdot 500^2} = 1575 \Omega.$$

$$I_e = \frac{U_e}{Z}; \quad I_e = \frac{130}{1575} = 0,083 \text{ A.}$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{L\omega}{R}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{0,5 \cdot 2\pi \cdot 500}{67} = 23,4;$$

$$\varphi = 87^\circ 33'; \quad \cos \varphi = 0,043$$

$$W = U_e I_e \cos \varphi; \quad W = 130 \cdot 0,083 \cdot 0,043 = 0,45 \text{ W.}$$

Conclusion : La self « étouffe » le courant alternatif d'autant plus fortement que la fréquence du courant est grande.

3. On remplace la self de l'exercice précédent par un condensateur de 2 μ F.

Mêmes questions.

SOLUTION. — a) Courant continu.

$$Z = \sqrt{65^2 + \frac{1}{0}} = \infty; \quad I = \frac{U_e}{Z} = 0; \quad W = UI = 0.$$

b) Courant alternatif de fréquence 50 :

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}; \quad Z = \sqrt{65^2 + \frac{1}{(2 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50)^2}} = 1595 \Omega.$$

$$I_e = \frac{U_e}{Z}; \quad I_e = \frac{130}{1595} = 0,0815 \text{ A.}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{RC\omega}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{65 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50} = 24,5;$$

$$\varphi = 87^{\circ}40'; \quad \cos \varphi = 0,04.$$

$$W = U_e I_e \cos \varphi; \quad W = 130 \cdot 0,0815 \cdot 0,04 = 0,424 \text{ W.}$$

c) Courant alternatif de fréquence 500 :

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}; \quad Z = \sqrt{65^2 + \frac{1}{(2 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 500)^2}} = 172 \Omega.$$

$$I_e = \frac{U_e}{Z}; \quad I_e = \frac{130}{172} = 0,75 \text{ A.}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{RC\omega}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{65 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 500} = 2,45;$$

$$\varphi = 67^{\circ}48'; \quad \cos \varphi = 0,377.$$

$$W = U_e I_e \cos \varphi; \quad W = 130 \cdot 0,75 \cdot 0,377 = 36,8 \text{ W.}$$

Conclusion : Le condensateur « étouffe » d'autant moins le courant alternatif que la fréquence du courant est grande.

4. Calculer la fréquence du courant qui parcourt un circuit comprenant une self dont le coefficient est de $1/2000$ H et une capacité de $1/2000$ μ F sachant qu'il y a résonance.

SOLUTION. — La relation $T = 2\pi \sqrt{LC}$ donne :

$$T = 2 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^9}} = 3,14 \cdot 10^{-6}$$

La fréquence du courant est donc

$$r = \frac{1}{T}; \quad r = \frac{10^6}{3,14} \neq 320\,000 \text{ cycles ou } 320 \text{ kilocycles.}$$

§ 2. — PRODUCTION ET UTILISATION DES COURANTS ALTERNATIFS.

1. ALTERNATEURS.

372. ALTERNATEUR MONOPHASÉ. — L'alternateur est basé sur les phénomènes d'induction produits par un champ tournant.

Principe. — L'inducteur est formé de plusieurs électro-aimants mobiles (quatre dans l'alternateur schématisé par la figure 453). L'inducteur tourne à l'intérieur de l'induit qui est constitué d'un anneau en fer doux portant quatre bobines fixes A, B, A', B'. Les lignes de force issues de chaque pôle Nord se partagent dans l'anneau en fer doux en deux parties égales et se dirigent vers les pôles Sud voisins. La rotation de l'inducteur entraîne la rotation du flux magnétique dans l'induit. Chaque bobine de l'induit est le siège de courants induits d'intensité maximum lors du passage des pôles devant la bobine, d'intensité minimum lors du passage des pôles par

les bissectrices inter-bobines *ss*. Puisqu'il y a alternance de pôles Nord et de pôles Sud, le courant induit change de sens dans chaque bobine lors du passage des pôles par les bissectrices inter-bobines *ss*. Les bobines sont reliées entre elles de manière que les courants induits s'ajoutent (fig. 453). Le courant qui s'écoule dans le circuit par les

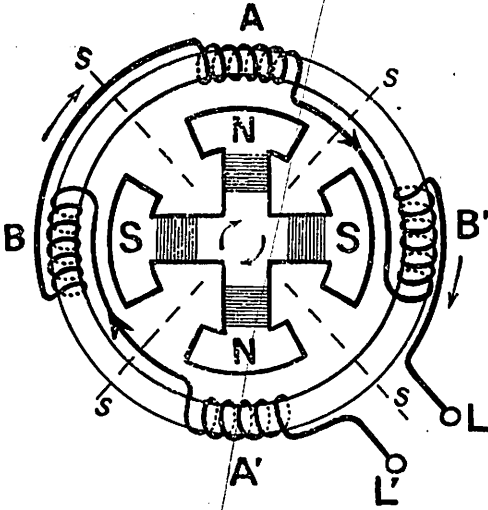


Fig. 453.

bornes L et L' reliées en permanence aux extrémités des bobines A' et B' est un courant alternatif.

Réalisation pratique. — L'inducteur mobile (rotor) est formé d'un volant calé sur l'arbre moteur d'une machine à vapeur ou d'une

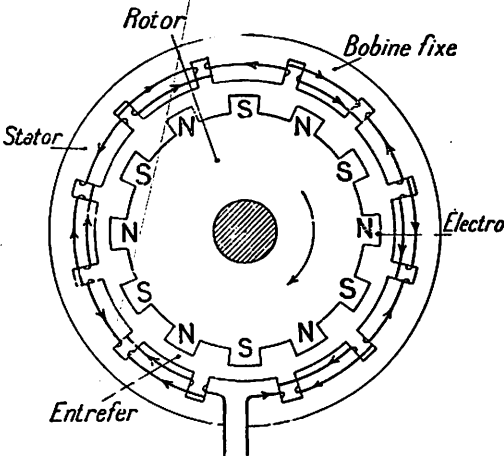


Fig. 454.

turbine. Sur la jante de ce volant sont fixés les électro-aimants à pôles alternés (fig. 454). Le courant d'excitation de ces électro-aimants est

fourni par une dynamo auxiliaire à courant continu. L'induit fixe (stator) est constitué d'un anneau formé de tôles de fer doux portant des encoches à l'intérieur desquelles sont logés les fils de cuivre isolés formant bobine.

373. ALTERNATEUR TRIPHASÉ. — Dans l'alternateur monophasé, le nombre de bobines de l'induit est égal au nombre de pôles de l'inducteur. Dans

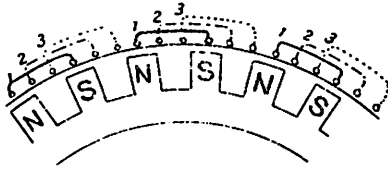


Fig. 455.

l'alternateur triphasé, les bobines de l'induit, trois fois plus nombreuses que les pôles inducteurs, sont décalées d'un tiers de l'intervalle séparant deux pôles successifs et sont groupées en trois séries (fig. 455). Chaque série

aboutit à deux bornes particulières. Les courants induits dans les séries de bobines 1, 2 et 3 ne sont pas en phase : ils sont décalés l'un sur l'autre d'un tiers de période. Les variations en fonction du temps de l'intensité des courants induits dans les trois séries de bobines sont représentées par les courbes 1, 2 et 3 (fig. 456). Elles sont données par les relations :

$$I_1 = I_m \sin \omega t;$$

$$I_2 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right);$$

$$I_3 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right).$$

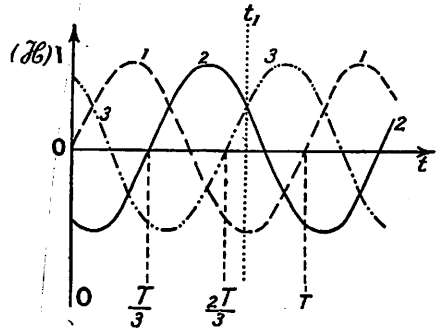


Fig. 456.

Les trois conducteurs qui aboutissent aux bornes de l'alternateur triphasé sont parcourus par des courants dits courants triphasés. Ces courants triphasés possèdent une propriété remarquable : si on réunit les trois conducteurs de départ des courants triphasés pour faire revenir le courant par un seul conducteur, ce dernier n'est parcouru par aucun courant : la somme des intensités des trois phases est nulle.

374. TRANSPORT DES COURANTS TRIPHASÉS. — Le transport des courants triphasés n'exige que trois fils de ligne. Dans le montage en étoile (fig. 457), on réunit ensemble l'une des extrémités des trois enroulements induits et on relie les autres extrémités aux trois fils de ligne d'utilisation. Les fils de retour peuvent être remplacés par un seul fil appelé fil neutre ou même être supprimés puisque le fil neutre n'est parcouru par aucun courant. Dans le montage en triangle (fig. 458), on réunit les trois enroulements induits en

série et on relie les trois fils de ligne aux points de jonction des enroulements induits.

On démontre que la tension maximum entre deux phases vaut :

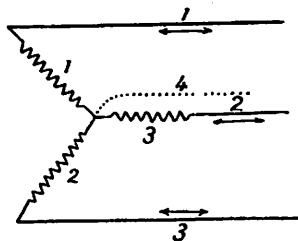


Fig. 457.

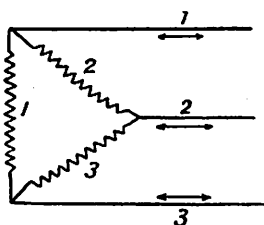


Fig. 458.

$U_m\sqrt{3}$ (U_m : tension maximum d'une phase) et que l'intensité maximum du courant produit par cette tension vaut : $I_m\sqrt{3}$ (I_m : intensité maximum d'une phase).

2. MOTEURS A COURANT ALTERNATIF.

Les moteurs à courant alternatif se divisent en deux classes : les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

375. MOTEUR SYNCHROME.

Principe. — Une aiguille aimantée ns placée entre les branches d'un aimant en fer à cheval NS s'oriente d'elle-même dans la direction du champ magnétique (fig. 459). Communiquons à l'aimant en fer à cheval un mouvement de rotation uniforme autour de l'axe OO' . Si le mouvement de rotation est peu rapide, l'aiguille aimantée est entraînée et tourne en synchronisme avec l'aimant. Si le mouvement de rotation est très rapide, l'aiguille aimantée, à cause de son inertie, n'est entraînée par l'aimant que si nous lui communiquons préalablement la même vitesse de rotation.

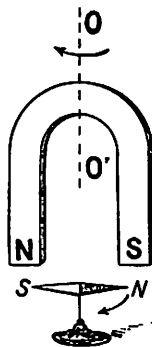


Fig. 459.

Réalisation pratique. — L'alternateur monophasé est une machine réversible. Lançons dans le stator d'un alternateur dont les électro-aimants sont excités un courant alternatif monophasé. Les pôles magnétiques des noyaux des bobines du stator s'inversent toutes les demi-périodes. Le rotor ne peut tourner que si les forces magnétiques conservent leur sens : à cet effet, il faut que le changement de sens du courant dans le stator se produise lorsque les pôles des électro-aimants du rotor passent par les bissectrices inter-

bobines (fig. 460). Le moteur ne fonctionne donc qu'à une vitesse déterminée dite vitesse de synchronisme. Le moteur synchrone ne démarre pas spontanément, il doit être amené à la vitesse de synchro-

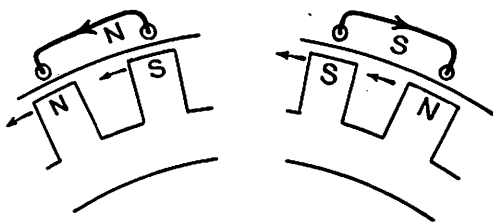


Fig. 460.

nisme (accrochage); il doit conserver pendant le fonctionnement la vitesse de synchronisme sinon il s'arrête (décrochage).

376. MOTEUR ASYNCHRONE A CHAMP TOURNANT.

Principe. — Un aimant en fer à cheval NS animé d'un mouvement de rotation uniforme autour de l'axe OO' entraîne un disque de cuivre placé entre ses branches (fig. 461). Sous l'action du champ tournant, le disque est le siège de courants de Foucault. Ces courants donnent naissance à des forces électromagnétiques qui, en vertu de la

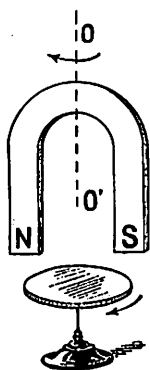


Fig. 461.

loi de Lenz, s'opposent au déplacement relatif du champ inducteur par rapport au disque et qui, par conséquent, mettent le disque en mouvement.

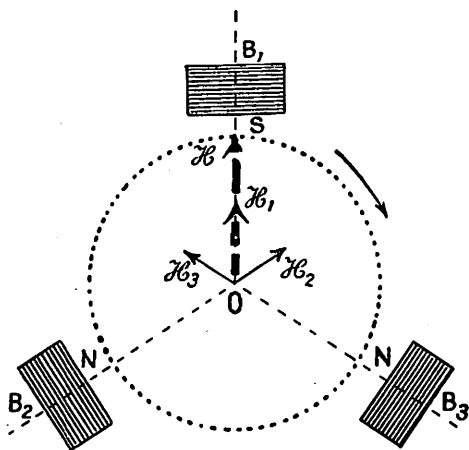


Fig. 462.

Réalisation pratique. — **Stator.** — Trois bobines identiques B_1 , B_2 et B_3 sont disposées régulièrement à 120° l'une de l'autre autour d'un point central O (fig. 462). Chacune des bobines est parcourue par un des courants triphasés. Il en résulte au point O un champ

***383. APPLICATIONS.** — Les redresseurs de courants alternatifs sont employés pour la charge des accumulateurs, pour l'alimentation des postes récepteurs de T. S. F. au moyen du courant alternatif du secteur.

§ 5. OSCILLATIONS ÉLECTRIQUES.

1. EXPÉRIENCES DE HERTZ.

384. DÉCHARGE OSCILLANTE. — Ouvrons le robinet à large voie dont est muni un tube en U de large section : la branche A remplie d'eau est mise en communication avec la branche B vide (fig. 472). La résistance offerte au liquide étant faible, le liquide effectue une série d'oscillations dont les amplitudes décroissent progressivement pour finalement atteindre son état d'équilibre (fig. 472).

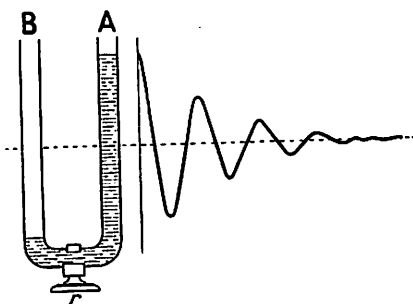


Fig. 472.

Relions les deux armatures d'un condensateur chargé Caux boules d'un éclateur E par un circuit de faible résistance (fig. 473). Lorsque l'étincelle jaillit, les deux armatures sont brusquement mises en communication. Un courant passe dans le circuit de l'armature au potentiel le plus élevé à l'armature au potentiel le moins élevé. Mais à cause de la self-induction du circuit (qu'on peut renforcer par l'introduction de quelques spires S), le courant ne s'arrête pas lorsque

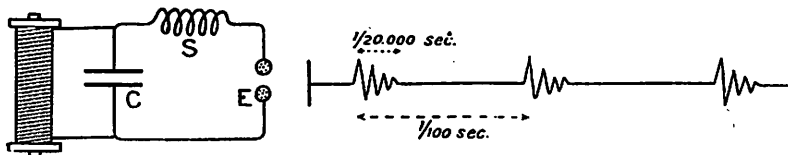


Fig. 473.

les armatures sont au même potentiel ; la différence de potentiel s'inverse ; un courant de sens inverse au sens du premier courant parcourt le circuit et ainsi de suite jusqu'à égalisation des potentiels des armatures. La décharge, qui semble être constituée d'une étincelle unique, est formée de plusieurs étincelles extrêmement rapprochées, de plus en plus faibles ; nous pouvons nous en rendre compte en analysant l'étincelle au moyen d'un oscillographe cathodique (n° 393). Pendant ladurée très courte de la décharge (1/20 000 de seconde, par exemple), le circuit est le siège d'un courant alternatif amorti. La décharge est dite oscillante. Si le circuit oscillant est relié à une bobine de Ruhmkorff, les décharges oscillantes se succèdent à intervalles rapprochés (1/100 de seconde) (fig. 473).

*L'étude systématique du phénomène a conduit aux résultats suivants : 1^o) La période du courant alternatif de décharge est donnée par la formule (n^o 371) :

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

2^o) La décharge n'est oscillante que si la résistance ohmique R du circuit est inférieure à $2\sqrt{L/C}$

$$R < \sqrt{4 \frac{L}{C}}$$

385. OSCILLATIONS AMORTIES-EMETTEUR DE HERTZ.

— Pour produire des décharges oscillantes de fréquence très élevée

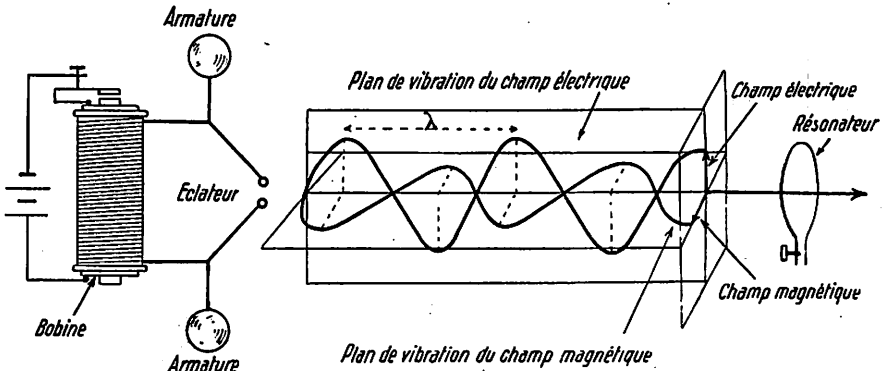


Fig. 474.

(plusieurs centaines de millions de cycles), il faut diminuer la capacité et la self du circuit (tout en observant la condition $R < \sqrt{4 L/C}$ énoncée au numéro précédent). En employant un dispositif formé de deux sphères métalliques, formant un condensateur de faible capacité, reliées par des tiges métalliques aux boules de l'éclateur d'une bobine d'induction, Hertz a pu obtenir une fréquence de 10^{12} cycles (fig. 474).

386. ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES - RÉSONATEUR DE HERTZ.

— Les variations très rapides du courant alternatif dans le circuit oscillant de Hertz engendrent dans l'espace des variations correspondantes des champs électriques et magnétiques. Ces champs oscillent à la fréquence de la décharge oscillante ; ils peuvent être mis en évidence en faisant appel au phénomène de résonance. Le résonateur de Hertz est constitué d'un cerceau métallique ouvert (fig. 474) ; il est accordé, au moyen d'une vis, de façon à être en résonance avec les champs oscillants. Les variations très rapides des champs produisent dans le résonateur des courants induits : de petites étincelles jaillissent à la coupure du résonateur. Le résonateur sert donc de détecteur des champs oscillants.

Les variations alternatives des champs ne se transmettent pas instantanément à tout l'espace environnant ; ces perturbations électromagnétiques se propagent à la vitesse de la lumière c'est-à-dire à la vitesse de 300 000 km/s. Ces perturbations qui se propagent, depuis leur centre de production, avec une vitesse identique, dans toutes les directions constituent les **ondes hertziennes** ou encore **ondes électromagnétiques** (fig. 474).

2. LAMPE A TROIS ÉLECTRODES.

387. LAMPE A TROIS ÉLECTRODES. — La lampe à trois électrodes ou triode, inventée en 1916 par de Forest, est constituée d'une ampoule en verre renfermant un **filament** de tungstène, une **plaque** de nickel et une **grille**, treillis métallique disposé entre la plaque et le filament (fig. 475). A l'intérieur de l'ampoule, règne un vide très poussé. Une batterie de chauffage (4 volts) porte le filament à l'incandescence; une batterie de haute tension (120 volts), dont le pôle positif est relié à la plaque et le pôle négatif au filament, porte la plaque à un potentiel élevé; une batterie dont on peut faire varier le nombre d'éléments utilisés par le jeu d'un curseur C relie la grille au filament. Nous avons ainsi constitué trois circuits: le **circuit de chauffage du filament** comprenant la batterie de chauffage et le filament; le **circuit de plaque** constitué par la batterie de haute tension, la plaque, l'espace plaque-filament et le filament; le **circuit de grille** formé par la batterie de tension variable, la grille, l'espace grille-filament et le filament. Ces trois circuits ont un point commun : le point O. Deux milliampèremètres M et M' permettent de mesurer respectivement les intensités des courants de plaque et de grille.

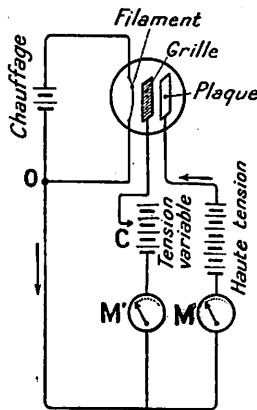


Fig. 475.

Etudions les variations d'intensité du courant de plaque et du courant de grille lorsque nous modifions le potentiel de la grille. Appliquons à la grille un potentiel bien inférieur au potentiel du filament (nous relierons, à cet effet, la grille à la borne négative de la batterie de tension variable) ; la grille repousse énergiquement tous les électrons émis par le filament; aucun courant ne passe dans le circuit de plaque. Elevons progressivement la tension de la grille. Lorsque le potentiel de la grille n'est plus inférieur que d'une vingtaine de volts au potentiel du filament, quelques électrons traversent la grille et sont captés par la plaque : le courant de plaque apparaît. A mesure que le potentiel de la grille se rapproche du potentiel du filament, le nombre d'électrons captés par la plaque croît rapidement :

l'intensité du courant de plaque augmente. Lorsque le potentiel de la grille devient supérieur au potentiel du filament, quelques électrons sont captés par la grille : le courant de grille apparaît. Continuons à

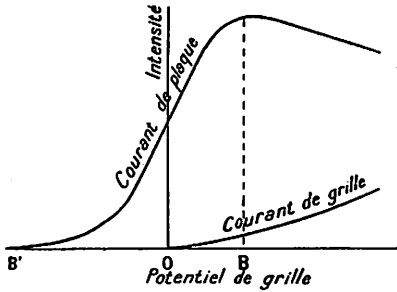


Fig. 476.

élever le potentiel de grille ; le nombre d'électrons captés par la plaque et par la grille augmente rapidement : le courant de plaque et le courant de grille croissent simultanément jusqu'à ce que tous les électrons émis par le filament soient captés. Elevons encore le potentiel de la grille; le nombre d'électrons captés par la grille augmente aux dépens du nombre d'électrons captés par la plaque :

l'intensité du courant de grille croît aux dépens de l'intensité du courant de plaque. La figure 476 donne les variations d'intensité des courants de plaque et de grille en fonction du potentiel appliqué à la grille.

Nous allons examiner comment ces caractéristiques sont mises à profit pour produire des oscillations électriques entretenues, pour amplifier et pour détecter les ondes hertziennes.

388. LAMPE OSCILLATRICE. — La triode peut être utilisée pour la production d'oscillations électriques entretenues d'amplitude constante. Dans le circuit de plaque d'une lampe à trois électrodes, intercalons un circuit oscillant comprenant une self *S* et un condensateur *C* (fig. 477). Réunissons la grille au filament par une self *S'* couplée à la self *S*.

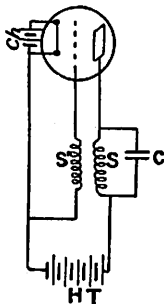


Fig. 477.

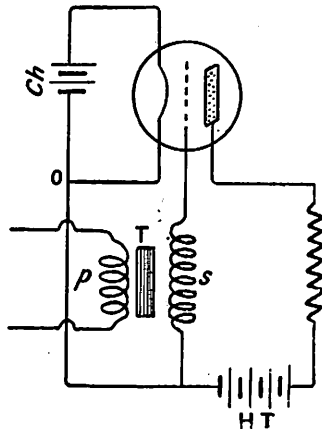


Fig. 478.

Portons le filament à l'incandescence : le courant de la batterie de haute tension passe dans l'espace plaque-filament et dans le circuit

oscillant. Il produit dans la self S une force électromotrice de self-induction qui charge le condensateur C. Ce premier passage du courant amorce les oscillations dans le circuit oscillant comme un léger choc met en branle le pendule d'une horloge. Les oscillations dans la self S se transmettent par induction à la self S' : il en résulte que la grille est soumise, synchroniquement aux oscillations du circuit SC, à des potentiels alternatifs. Le potentiel de la grille oscille donc entre deux valeurs : l'intensité du courant de plaque croît et décroît synchroniquement aux oscillations du potentiel de grille (fig. 476). Par suite des réactions du circuit de plaque sur le circuit de grille, l'amplitude des oscillations du circuit SC s'élève progressivement jusqu'à ce que les variations du potentiel de la grille atteignent les valeurs B et B' (fig. 476). Le régime stable est alors établi : le circuit SC est le siège d'oscillations électriques d'amplitude constante et maximum.

Lampe à triode utilisée comme amplificateur
389. LAMPE AMPLIFICATRICE.

— La triode peut être utilisée pour l'amplification des courants alternatifs. Le courant alternatif à amplifier passe dans le primaire d'un transformateur T dont le secondaire est relié au filament et à la grille de la triode (fig. 478) : les variations très faibles du courant dans le primaire induisent dans le secondaire une force électromotrice alternative qui porte la grille à des potentiels oscillant entre A et A' (fig. 479). Il en résulte dans le circuit de plaque de la triode des variations d'intensité de courant

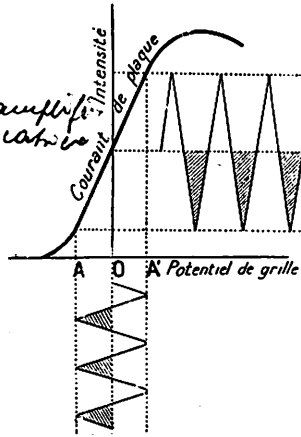


Fig. 479.

analogues aux variations d'intensité du courant à amplifier mais caractérisées par une amplitude plus grande.

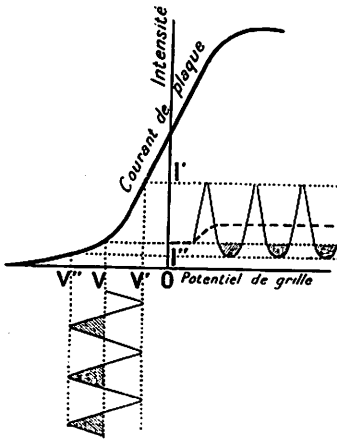


Fig. 480

passé de V à V''. Les intensités du courant de plaque correspondant

390. LAMPE DÉTECTRICE. — La triode peut être utilisée pour la détection des courants alternatifs de haute fréquence. Si le potentiel de la grille oscille entre deux valeurs V' et V'' autour de la valeur négative V, l'intensité du courant de plaque varie entre I' et I'' (fig. 480). Le graphique montre que l'intensité du courant de plaque augmente beaucoup plus fortement lorsque le potentiel de la grille passe de V à V' qu'il ne diminue lorsque le potentiel de la grille

à une alternance l'emportent sur les intensités du courant de plaque correspondant à l'alternance suivante. L'intensité moyenne du courant de plaque (courbe en traits discontinus) est plus élevée lorsque la grille oscille entre les potentiels V' et V'' que lorsqu'elle demeure au potentiel V : le courant qui circule dans le circuit de plaque est dit détecté.

3. TÉLÉPHONIE SANS FIL.

391. POSTE D'ÉMISSION. — Un poste d'émission comprend en principe : un générateur d'ondes entretenues, un émetteur et un modulateur (fig. 481).

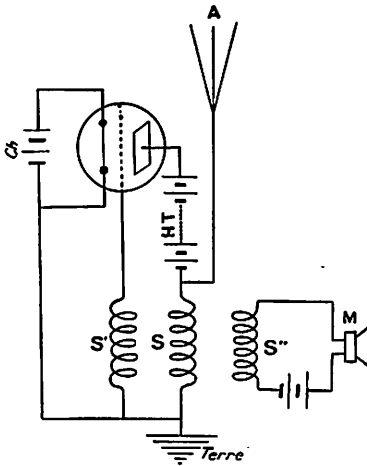


Fig. 481.

Générateur. — Le générateur est constitué d'une lampe à trois électrodes fonctionnant comme oscillatrice (n° 388).

Émetteur. — Le circuit oscillant est formé d'une self S et d'une capacité antenne-terre (l'antenne et la terre forment en effet les armatures d'un condensateur). L'antenne dont l'extrémité A est soigneusement isolée est le siège d'oscillations électriques : elle rayonne donc dans l'espace des ondes électromagnétiques d'am-

plitude constante et de haute fréquence. Ces ondes constituent les ondes porteuses (fig. 482 a).

Modulateur. — Pour transmettre des signaux conventionnels (télégraphie sans fil) ou la parole (téléphonie sans fil), l'onde porteuse doit être modulée. A cet effet, la self S du circuit oscillant est couplée à la self S'' d'un circuit comprenant un microphone M . Lorsqu'on parle devant le microphone, la membrane microphonique vibre synchroniquement avec la voix, la résistance ohmique du microphone et, par conséquent, l'intensité du courant

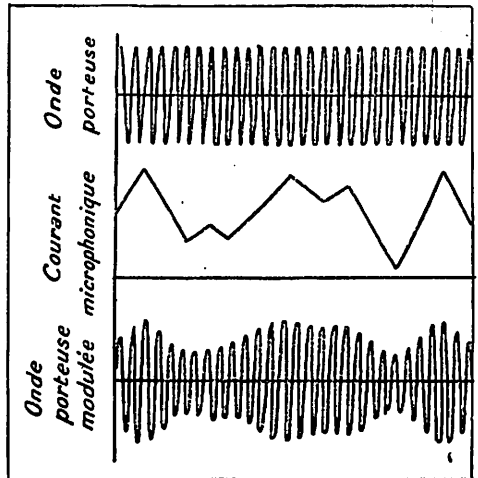


Fig. 482.

plupart, l'intensité du courant

microphonique varient synchroniquement avec les vibrations de la membrane (fig. 482 *b*). Par suite des réactions de la self S'' sur la self S , l'onde porteuse subit des variations d'amplitude synchrones des vibrations de la voix. L'onde hertzienne est modulée (fig. 482 *c*).

392. POSTE DE RÉCEPTION. — Un poste de réception comprend en principe : une antenne, un détecteur et un écouteur (fig. 483).

Antenne. — L'antenne qui comporte une self S' et un condensateur variable C' est accordée sur l'onde porteuse par réglage du condensateur. L'antenne est alors le siège d'oscillations d'amplitude maximum (fig. 484 *a*).

Détecteur. — Les détecteurs d'ondes électromagnétiques sont de trois types : le détecteur à cristaux (galène), le détecteur électrolytique et la triode. La triode est à l'heure actuelle presque universellement employée.

La self d'antenne S' induit dans le circuit oscillant SC , accordé sur le circuit d'antenne, des oscillations synchrones des oscillations dont l'antenne est le siège. Les oscillations du circuit SC produisent par l'intermédiaire de la résistance R des variations alternatives du potentiel de la grille autour de son potentiel d'équilibre (fig. 484 *b*). Ce potentiel obtenu par la batterie de tension variable est tel que la lampe fonctionne comme détectrice (n° 390). Le circuit de plaque est donc parcouru par un courant détecté c'est-à-dire par un courant formé d'une série de poussées de courant dont la fréquence est identique à la fréquence de l'onde porteuse (fig. 484 *c*).

Écouteur. — Le circuit de plaque comporte un téléphone T (ou un diffuseur) dont la membrane présente trop d'inertie pour suivre les pulsations haute-fréquence du courant (fig. 484 *d*). Tant que l'antenne ne reçoit que l'onde porteuse non modulée, l'intensité moyenne

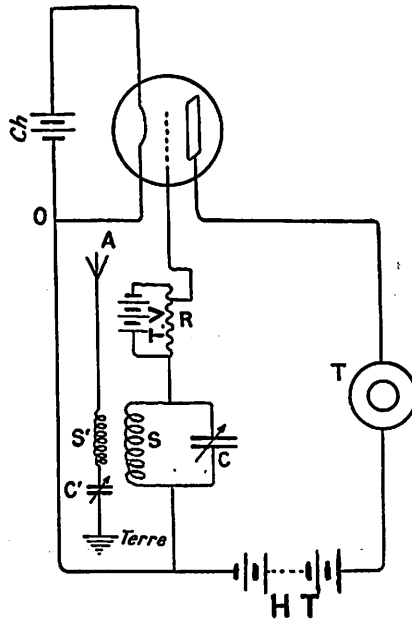


Fig. 483.

du courant qui passe dans le téléphone ou dans le diffuseur ne varie pas : le téléphone ou le diffuseur ne rend aucun son (fig. 484 e). Mais si l'antenne reçoit l'onde porteuse modulée, les modulations se

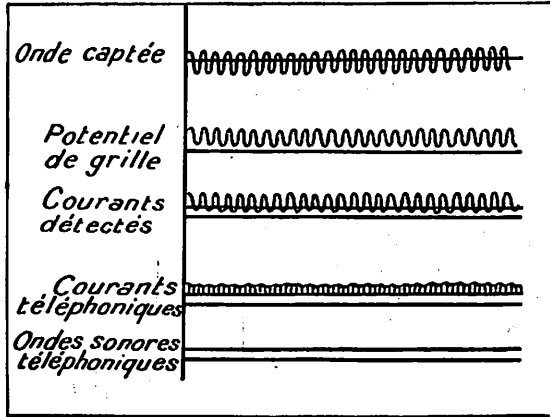


Fig. 484.

retrouvent dans les oscillations de l'antenne (fig. 485 a), dans les variations du potentiel de grille (fig. 485 b), dans les variations

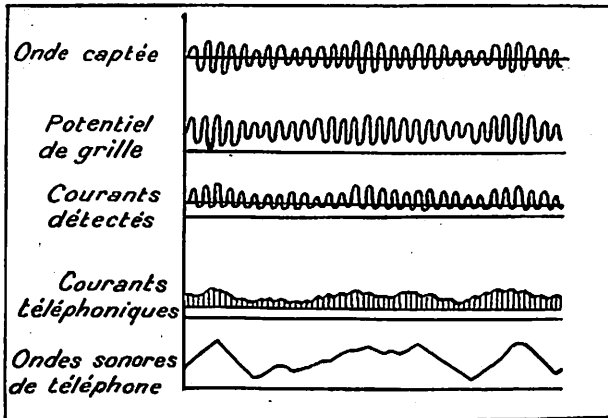


Fig. 485.

d'intensité du courant de plaque détecté (fig. 485 c). Dans ce cas, le courant de plaque présente une intensité moyenne qui varie avec la modulation de l'onde porteuse (fig. 485 d). La membrane du

téléphone ou du diffuseur suit cette modulation : elle reproduit fidèlement les vibrations de la membrane microphonique du poste émetteur (fig. 485 e).

Le diffuseur, type électrodynamique, est constitué d'un cône en carton dont la pointe est munie d'une bobine légère parcourue par le courant détecté (fig. 486). Cette bobine se déplace dans l'entrefer d'un puissant électro-aimant excité par un courant. Les variations du courant détecté se traduisent par des déplacements proportionnels de la bobine et du cône qui lui est solidaire : le cône émet donc des ondes sonores.

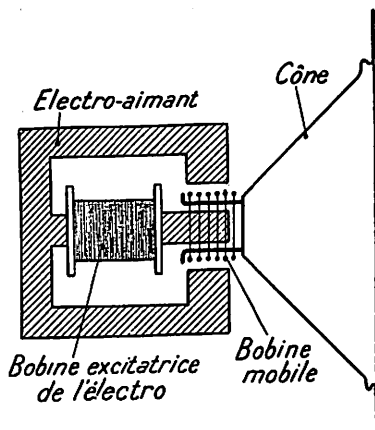


Fig. 486.

4. TÉLÉVISION.

***393. OSCILLOGRAPHE CATHODIQUE.** — L'oscillographe cathodique est une ampoule en verre dont le fond de la partie évasée est tapissé d'une substance fluorescente (fig. 487). La cathode qui

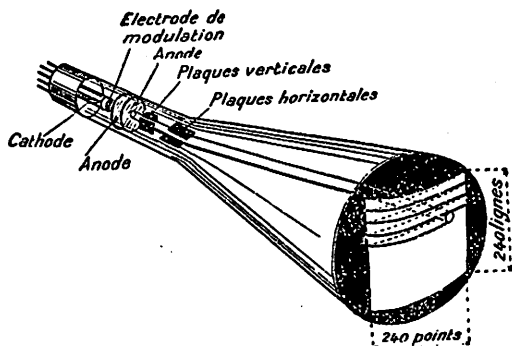


Fig. 487.

se trouve à l'extrémité de la partie cylindrique de l'ampoule est constituée d'un petit cylindre chauffé indirectement par un filament incandescent. Le faisceau électronique, qui jaillit de la cathode, est concentré en un très mince pinceau par passage à travers deux anodes tubulaires ordinairement appelés lentilles électroniques. Le pinceau cathodique suit une trajectoire rectiligne passant entre une paire de plaques verticales et une paire de plaques horizontales et illumine le point où il frappe l'écran (point d'impact).

Les plaques verticales et horizontales, qui constituent des condensateurs, sont reliées à des générateurs à haute tension par l'intermédiaire de grandes résistances :

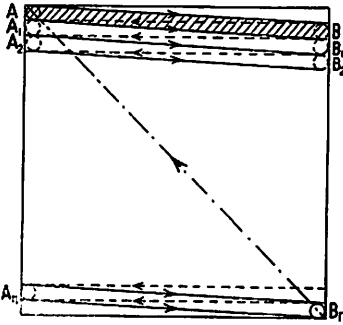


Fig. 488.

elles se chargent progressivement. Les armatures des condensateurs sont aussi reliées, l'une, à la grille et, l'autre, à la plaque d'un thyatron (lampe triode renfermant du néon sous faible pression). Le thyatron relié au condensateur vertical (thyatron de lignes) en produit la décharge brusque tous les $1/6000$ de seconde, temps correspondant à la charge de ce condensateur. Le thyatron relié au condensateur horizontal (thyatron d'images) en produit

la décharge brusque tous les $1/25$ de seconde, temps correspondant à la charge de ce condensateur.

Pendant la charge progressive des condensateurs, le spot photocathodique se déplace sur l'écran horizontalement sous l'influence du condensateur vertical et verticalement sous l'influence du condensateur horizontal : le spot décrit donc une ligne AB très faiblement inclinée sur l'horizontale (fig. 488). Lorsque le spot arrive à l'extrémité de la ligne, la tension entre les plaques du condensateur vertical est devenue suffisante pour en produire la décharge à travers le thyatron de lignes : le spot décrit en un millionième de seconde le trajet horizontal BA_1 . Le spot ramené en A_1 repart pour décrire la ligne A_1B_1 , saute de B_1 en A_2 , repart pour décrire la ligne A_2B_2 ... Lorsque le spot arrive en B_n dans le coin inférieur droit de l'écran, la tension entre les plaques du condensateur horizontal est devenue suffisante pour en produire la décharge à travers le thyatron d'images : le spot saute de B_n en A en un millionième de seconde.

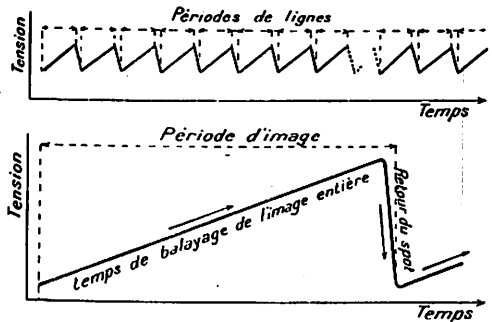


Fig. 489.

Le graphique de la figure 489 indique les variations des tensions des condensateurs en fonction du temps.

Le graphique de la figure 489 indique les variations des tensions des condensateurs en fonction du temps.

L'écran a été décomposé en 240 lignes par le balayage photocathodique.

394. POSTE ÉMETTEUR. — Le dispositif d'émission comporte l'**iconoscope** inventé par Zworykin (ingénieur américain). L'iconoscope est un oscillographe cathodique dont l'écran fluorescent est remplacé par un écran en mica (fig. 490). Les faces de cet écran sont recouvertes, l'une, d'une mosaïque M constituée par un très grand nombre (75 000) de microscopiques globules d'argent sensibilisé au césium et, l'autre, d'une mince pellicule P d'argent réunie à une résistance R. Chaque globule d'argent forme avec l'élément de la pellicule d'argent lui faisant vis-à-vis un petit condensateur. La paroi de l'iconoscope correspondant à la partie en pointillé de la figure est recouverte d'une couche conductrice de graphite. Cette couche de graphite dont le potentiel est supérieur à celui de la mosaïque constitue le collecteur destiné à recueillir les électrons expulsés de la mosaïque par effet photoélectrique.

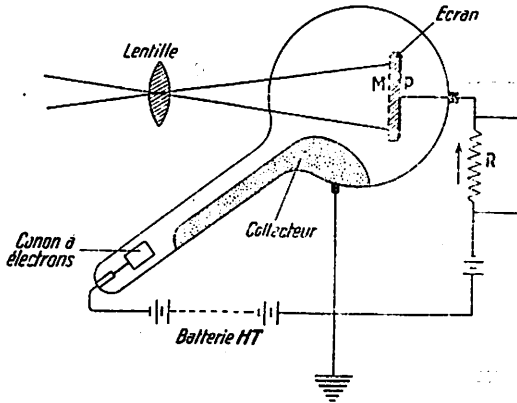


Fig. 490.

Par un jeu de lentilles, l'objet donne une image sur la mosaïque que balaie le pinceau électronique issu de la cathode de l'iconoscope.

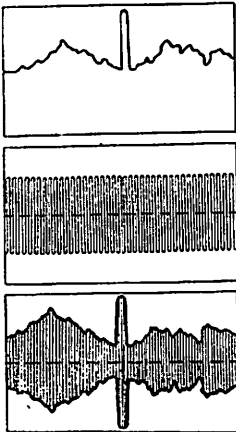


Fig. 491.

Considérons un point A' de la mosaïque correspondant au point obscur A de l'objet. Le pinceau électronique retrouve le point A' de la mosaïque dans le même état électrique que 1/25 de seconde auparavant : il ne lui cède donc pas d'électrons.

Considérons un point B' de la mosaïque correspondant au point brillant B de l'objet. Le pinceau électronique ne retrouve pas le point B' de la mosaïque dans le même état électrique que 1/25 de seconde auparavant car le point B', jouant cellule photoélectrique, a émis des électrons sous l'action de la lumière: le pinceau électronique lui cède donc des électrons. Le courant de recharge du condensateur ne dure qu'environ 1/2 000 000 de seconde tandis que le courant de décharge dure 1/25 de seconde. Le courant de recharge est donc 75 000 fois plus intense que le courant de décharge. Seul, le courant de recharge

joue un rôle efficace dans la résistance R. Comme l'intensité de la lumière de l'objet varie d'un point à l'autre, le courant de recharge varie d'une cellule photoélectrique élémentaire à l'autre : le courant qui parcourt la résistance R est modulé (fig. 491 a). Le courant présente à chaque fin de ligne comme à chaque fin d'image une poussée d'intensité appelée « top de synchronisme » ou encore signal de synchronisation de fin de ligne ou de fin d'image (fig. 491 a).

Le courant, après amplification, module les ondes haute-fréquence émises par un poste de téléphonie sans fil (fig. 491 b et c).

On fabrique à l'heure actuelle des iconoscopes qui permettent de décomposer les images en 819 lignes.

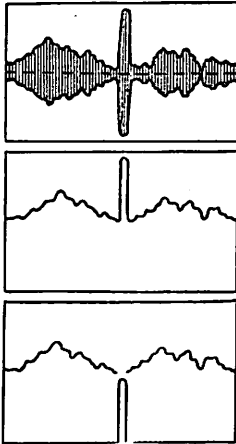


Fig. 492.

395. POSTE RÉCEPTEUR. — Le dispositif de réception comporte un oscillographe cathodique.

Les oscillations modulées de l'antenne réceptrice sont, après amplification, détectées (fig. 492 a et b). Le courant détecté passe par un appareil spécial qui sépare les top de synchronisme du courant modulé d'image (fig. 492 c). Le courant modulé d'image est dirigé sur une électrode spéciale appelée électrode de modulation qui commande directement

le flux cathodique de l'oscilloscope. Le flux électronique est donc modulé : l'intensité lumineuse du point d'impact est fonction de l'intensité du flux électronique.

Grâce à la persistance des impressions rétiniennes, l'image, bien que ponctuelle, apparaît continue.

5. RADAR.

***396. RADAR.** — Le radar, qui est le sigle de l'expression Radio détection and ranging, est le dispositif utilisé pendant la seconde guerre mondiale par les Nations Unies pour la détection et le repérage par radio des objets (avions, navires, sous-marins...) invisibles à l'œil nu.

Le radar utilise les ondes de haute fréquence (ondes de quelques centimètres de longueur d'onde) car ces ondes jouissent de propriétés remarquables : elles peuvent être aisément dirigées dans l'espace, elles se réfléchissent facilement sur les solides, elles ne sont pas « brouillées » par les perturbations atmosphériques ordinaires (orages, parasites industriels...) qui sont d'une tout autre fréquence.

Considérons un émetteur lançant à intervalles réguliers dans toutes les directions, mais particulièrement dans une direction déter-

minée des trains d'onde (impulsions) de haute fréquence et un récepteur muni d'un oscilloscope (fig. 493). Un thyristron ou base

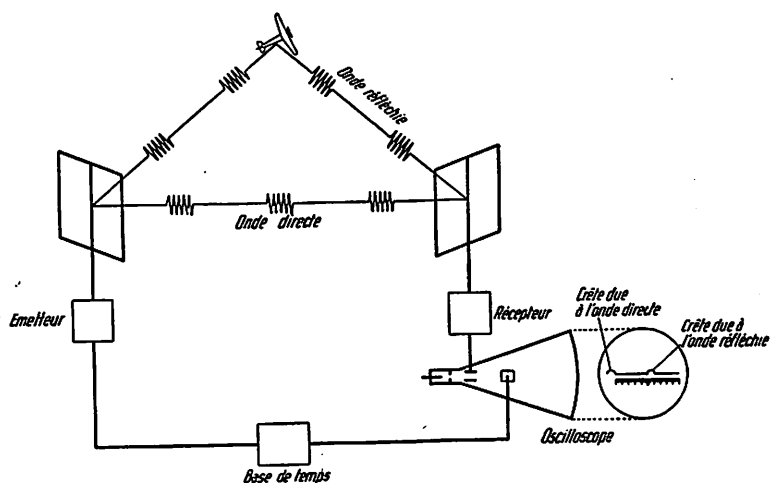


Fig. 493.

de temps agit sur les plaques verticales de l'oscilloscope de manière que le spot inscrive sur l'écran fluorescent une ligne lumineuse horizontale. L'antenne du récepteur agit, après détection et amplification, sur les plaques horizontales de l'oscilloscope. Lorsqu'un des trains d'onde lancé par l'émetteur atteint le récepteur, le spot est, pendant le très court temps que dure le train d'onde, dévié vers le haut de sorte qu'il décrit une crête lumineuse. La base de temps commande simultanément l'émetteur et le récepteur de façon que les trains d'onde émis à intervalles réguliers produisent toujours la crête lumineuse au début de la ligne lumineuse : il en résulte que la crête lumineuse apparaît immobile (fig. 494).

Supposons qu'un obstacle se trouve sur le trajet des ondes émises par le radar. L'onde réfléchie par l'obstacle est captée par le récepteur et produit une seconde crête lumineuse dans la ligne lumineuse (fig. 495).

Si l'obstacle réfléchissant est immobile, la crête lumineuse due à l'onde réfléchie se produit toujours au même endroit de la ligne lumineuse car le retard de l'onde réfléchie sur l'onde directe est constant : ce retard se marque donc sur l'écran de l'oscilloscope par la distance séparant les deux crêtes lumineuses. Supposons pour fixer les idées que le cycle entier se produise 1000 fois par seconde

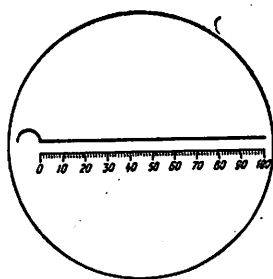


Fig. 494.

et que l'écho s'inscrive à la moitié du cycle : le retard de l'onde réfléchié sur l'onde directe est de $1/2000^e$ de seconde; l'espace parcouru par l'onde qui se réfléchié sur l'obstacle est donc $300\ 000 \cdot 0,0005$ ou 150 km et la distance de l'obstacle réfléchié à

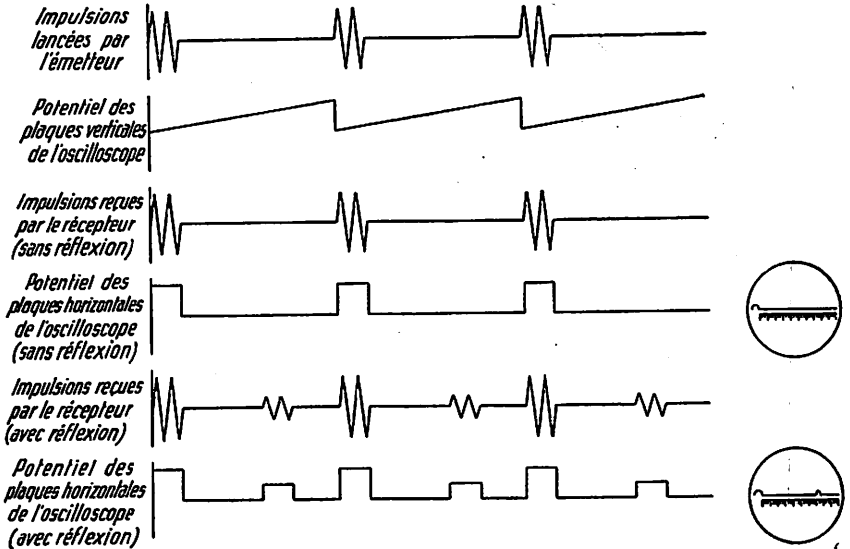


Fig. 495.

l'appareil de radar est de 75 km. Il est donc possible de graduer l'oscilloscope en distances kilométriques.

Si l'obstacle réfléchié est en mouvement, la crête lumineuse due à l'onde réfléchié se déplace et la vitesse de déplacement de la crête lumineuse permet d'évaluer la vitesse de translation de l'obstacle.

Pour déterminer avec exactitude la position d'un point dans

l'espace, il faut déterminer trois coordonnées. Dans le radar, on détermine la portée ou distance, la direction en azimuth (direction par rapport au méridien du lieu) et la direction en hauteur (direction par rapport à l'horizontale) (fig. 496) : c'est pourquoi les stations importantes de radar comprennent non seulement plusieurs antennes, mais aussi trois oscilloscopes :

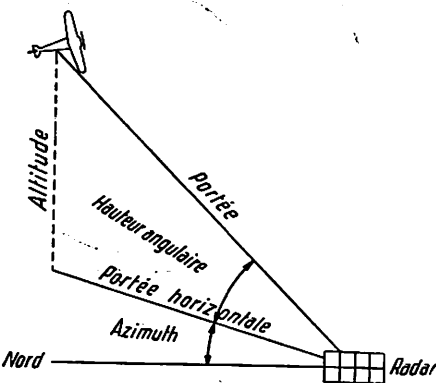


Fig. 496.

l'oscilloscope de portée, l'oscilloscope d'azimuth et l'oscilloscope d'élévation.

6. SONORISATION DU CINÉMA.

***397. ENREGISTREMENT DES SONS.** — Les variations d'intensité du courant microphonique, produites par les sons à enregistrer, créent après amplification (5 000 à 10 000), des variations synchrones de l'intensité lumineuse d'une lampe spéciale appelée tube à lueurs. La lumière émise par cette lampe impressionne la bande marginale ou bande sonore du film cinématographique d'autant plus fortement qu'elle est plus intense. Après développement du film, on obtient une piste à opacité variable. Cette piste est constituée de stries contiguës : ces stries sont d'autant plus noires que la lumière émise par le tube à lueurs a été moins intense c'est-à-dire que le son capté par le microphone a été plus faible (fig. 497).

***398. RESTITUTION DES SONS.** — Le film passe entre une source lumineuse intense (lecteur de film) et une cellule photoélectrique (fig. 497). L'opacité de la strie qui se trouve devant le lecteur

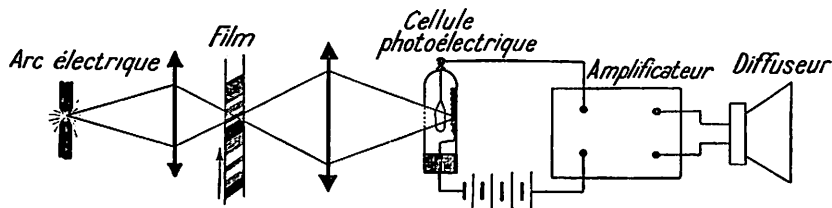


Fig. 497.

de film commande la lumière qui impressionne la cellule photoélectrique. Le courant photoélectrique qui en résulte est amplifié (50 000 à 100 000). Le courant amplifié agit sur le diffuseur qui restitue le son émis devant le microphone.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un orateur parle très près d'un microphone d'une station émettrice de T. S. F. Un auditeur se trouve à 8,50 m de l'orateur. Un amateur de T. S. F., situé à 6 800 km de la station d'émission, se poste à 3,40 m du diffuseur de l'appareil de réception. On demande lequel des deux auditeurs entend l'orateur le premier. On peut admettre que les transmissions microphone-antenne émettrice et antenne-réceptrice-diffuseur sont instantanées.

SOLUTION. — L'auditeur situé à 8,50 m de l'orateur perçoit le son émis 8,5/340 s c'est-à-dire 0,025 s après l'émission.

L'amateur de T. S. F. perçoit le son émis $\left(\frac{6\,800}{300\,000} + \frac{3,4}{340} \right)$ s c'est-à-dire 0,025 s après l'émission.

La perception est donc simultanée pour les deux auditeurs.

2. Un grand nombre de postes d'émission de T. S. F. utilisent une longueur d'onde comprise entre 200 et 600 m ou entre 1 000 et 2 000 m. a) Calculer les fréquences extrêmes de ces deux groupes d'ondes. b) Un amateur veut accorder un circuit oscillant comprenant un condensateur variable entre les limites 450 $\mu\text{e s}$ (ou cm) et 45 $\mu\text{e s}$ (ou cm) et une self fixe. Quelle valeur doit-il donner au coefficient de self L de chacune des selfs utilisables pour chacun des groupes d'ondes ?

SOLUTION. — a) Fréquences correspondant aux longueurs d'onde 200 m et 600 m

$$\nu = \frac{V}{\lambda}; \quad \nu = \frac{300\,000}{0,2} = 1\,500\,000 \text{ cycles}; \quad \nu' = \frac{300\,000}{0,6} = 500\,000 \text{ cycles.}$$

Fréquences correspondant aux longueurs d'onde 1 000 m et 2 000 m :

$$r = \frac{V}{\lambda}; \quad r = \frac{300\,000}{1} = 300\,000 \text{ cycles}; \quad r' = \frac{300\,000}{2} = 150\,000 \text{ cycles.}$$

b) Exprimons la capacité en farad :

$$450 \text{ } \mu\text{es} = \frac{450}{9 \cdot 10^{11}} = 50 \cdot 10^{-11} \text{ F} \quad \text{et} \quad 45 \text{ } \mu\text{es} = \frac{45}{9 \cdot 10^{11}} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ F.}$$

L'équation de résonance donne successivement

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \quad T^2 = 4\pi^2LC; \quad \frac{1}{r^2} = 4\pi^2LC; \quad L = \frac{1}{4\pi^2 r^2 C}$$

Pour la self correspondant aux ondes de longueurs d'onde 200 à 600 m :

Valeur maximum :

$$L = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 1\,500\,000^2 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} \neq \frac{1}{4\,500} \text{ H ou } 0,22 \text{ mH.}$$

Valeur minimum :

$$L = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 500\,000^2 \cdot 50 \cdot 10^{-11}} \neq \frac{1}{5\,000} \text{ H ou } 0,20 \text{ mH.}$$

On choisira donc une self comprise entre 0,20 et 0,22 mH.

Pour la self correspondant aux ondes de longueurs d'onde 1 000 à 2 000 m :

Valeur maximum :

$$L = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 300\,000^2 \cdot 5 \cdot 10^{-11}} \neq \frac{1}{180} \text{ H ou } 5,55 \text{ mH.}$$

Valeur minimum :

$$L = \frac{1}{4 \cdot 3,14^2 \cdot 150\,000^2 \cdot 50 \cdot 10^{-11}} \neq \frac{1}{450} \text{ H ou } 2,20 \text{ mH}$$

On choisira donc une self comprise entre 2,20 et 5,55 mH.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Une bobine plate de 20 cm de diamètre comprenant 200 spires circulaires en fil de laiton de 0,04 mm² de section tourne autour d'un axe vertical dans le champ magnétique terrestre dont la composante horizontale est 0,2 Oe. L'axe de la bobine est horizontal. Sachant que la résistivité du cuivre est 1,8 · 10⁻⁸ ohm.cm., que les extrémités de la bobine sont reliées en court-circuit et que la self de la bobine est négligeable, indiquer : a) le genre de courant qui parcourt la bobine; b) la position de la bobine lorsque le courant est nul; c) la variation de la force électromotrice en fonction du temps, la bobine tournant à raison de 15 tours/seconde; d) l'intensité maximum; e) l'intensité efficace du courant qui parcourt la bobine. R : a) courant alternatif dont la fréquence est égale à la fréquence de rotation de la bobine; b) le courant est nul lorsque le plan de la bobine est normal au champ magnétique terrestre; c) $E_t = 0,001185 \sin 94,2t$; d) 0,21 mA; e) 0,147 mA.

2. Une bobine cylindrique sans fer a une résistance ohmique de 30 Ω et un coefficient de self de 0,1 mH. Quelle est la résistance apparente de la bobine : a) pour des courants industriels de fréquence 50; b) pour la foudre dont la fréquence est de l'ordre de 500 000? R : a) 30 Ω; b) 317 Ω.

3. Un moteur à courant alternatif absorbe 45 A efficaces sous une tension de 130 V efficaces. La puissance réelle du moteur est, à ce moment, 4,5 kW. Déterminer : a) l'angle de déphasage de l'intensité sur la tension; b) le coefficient de self du moteur si la résistance ohmique est 2 Ω et si le courant est de 50 périodes/seconde. R. : a) 39°40'; b) 5,3 mH.

4. Un circuit est formé d'une lampe de 220Ω de résistance ohmique, d'une bobine de self de 2Ω de résistance ohmique et de 2 H de coefficient de self, ainsi que d'un condensateur de $10 \mu\text{F}$ de capacité groupés en série. La tension aux bornes du circuit est 130 V efficace; la fréquence du courant est 50 . Calculer : a) l'intensité efficace du courant dans le circuit; b) l'angle de déphasage; c) le facteur de puissance; d) la fréquence de résonance; e) l'intensité efficace dans le cas de résonance. R : a) $0,342 \text{ A}$; b) $54^\circ 40'$; c) $0,57$; d) $35,6$; e) $0,586 \text{ A}$.

5. Trois bobines identiques également distantes d'un point O ont leurs axes qui se coupent en ce point (fig. 415). Les axes de ces bobines font entre eux des angles de 120° . Chacune des bobines est parcourue par une des phases d'un courant triphasé de fréquence 50 : les intensités des courants qui parcourent les bobines sont donc données par les équations :

$$i_1 = I_m \sin 2\pi \frac{t}{T}; \quad i_2 = I_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{3} \right); \quad i_3 = I_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2}{3} \right)$$

a) Démontrer que le champ magnétique résultant au point O est constant et tourne d'un mouvement uniforme. b) Quelle sera la vitesse de rotation d'un petit aimant disposé au point O?

6. Un courant alternatif de fréquence 50 passe dans un électro-aimant placé face au milieu d'une corde de fer de 25 cm de longueur pesant 6 g au mètre. On peut régler progressivement la tension pour amener la corde en résonance. On demande les tensions appliquées à la corde pour produire la résonance. R. : $3,65 \cdot 10^5 \text{ dyn}$; $4 \cdot 3,75 \cdot 10^5 \text{ dyn}$; $9 \cdot 3,73 \cdot 10^5 \text{ dyn}$.

7. Un transformateur industriel reçoit un courant alternatif de 2000 V de tension efficace et de 10 A d'intensité efficace. La tension efficace aux bornes du secondaire est 160 V et le rendement du transformateur est $0,95$. Déterminer : a) le rapport de transformation; b) l'intensité du courant dans le secondaire. R : a) $12,5$; b) $118,75 \text{ A}$.

8. Une chute d'eau de 5 m débitant 3 m^3 à la seconde actionne une turbine hydraulique dont le rendement est $0,7$. La turbine actionne un alternateur (rendement $0,9$) qui envoie son courant par des fils de ligne au primaire d'un transformateur dont la tension efficace est 3000 V . Aux bornes du secondaire, la tension efficace est 130 V et la puissance est 80 kW . Le rendement du transformateur étant $0,95$, on demande : a) la perte de puissance due à l'effet Joule dans les fils de ligne; b) le nombre de spires du primaire du transformateur sachant que le secondaire comporte 260 spires. R : a) $8,50 \text{ kW}$ (6% de la puissance totale); b) 6000 spires.

9. Une voiture de tramway de 50 tonnes parcourt un trajet horizontal à la vitesse de 60 km/h . La force nécessaire pour maintenir cette vitesse est 15 kg' par tonne entraînée. Le moteur est actionné par un courant alternatif de fréquence 50 et de tension efficace 500 V . a) Quelle est la puissance du moteur exprimée en ch et en kW? b) Quelle doit-être l'intensité efficace du courant sachant que la résistance ohmique du moteur est 4Ω , que le coefficient de self du moteur est $0,002 \text{ H}$ et que le rendement global du moteur est 85% ? c) Quel est l'angle de déphasage? d) Quelle est l'intensité efficace du courant qui parcourt le moteur (en supposant que le facteur de puissance soit conservé) si le tramway monte à la même vitesse une pente de 3% ? R : a) $1000/6 \text{ ch}$, $122,66 \text{ kW}$; b) 292 A ; c) 9° ; d) 876 A .

10. Une lampe oscillatrice excite dans un circuit des oscillations électriques de fréquence $1500,5$ kilocycles. a) Quelle est la fréquence du battement qui se produit lorsque le circuit relié à l'antenne, reçoit des ondes électromagnétiques de 200 m de longueur d'onde? b) Que se produit-il pour une onde de 201 m de longueur d'onde? c) Que se produit-il pour une onde de 199 m de longueur d'onde ($c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$)? R. : a) fréquence du battement : 500 (audible au téléphone); b) fréquence du battement : 8000 (inaudible au téléphone); c) fréquence du battement : 7000 (inaudible au téléphone).

LECTURE

LE PROBLÈME DE L'ÉNERGIE

En 1798 paraissait à Londres un opuscule sur les périls que créerait le surpeuplement de notre planète. Son auteur, un pasteur du nom de Malthus, prétendait que la population du globe augmentait en progression géométrique



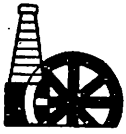
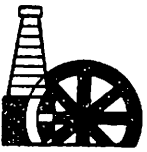








1 2 4 8 16

tandis que la production des aliments ne croissait qu'en progression arithmétique.

1 2 3 4 5

Grâce aux progrès réalisés en agriculture et plus particulièrement grâce à l'intensification des cultures, conséquence de la découverte des engrais chimiques, les famines, prévues par Malthus, ne se sont pas produites. Elles

CHASSE AU KILOWATT

	1850	1900	1930	1960
MACHINES	 6%	 38%	 84%	 96%
ANIMAUX	 79%	 52%	 12%	 1%
HOMMES	 15%	 10%	 4%	 3%

d'après Pétrole Progrès.

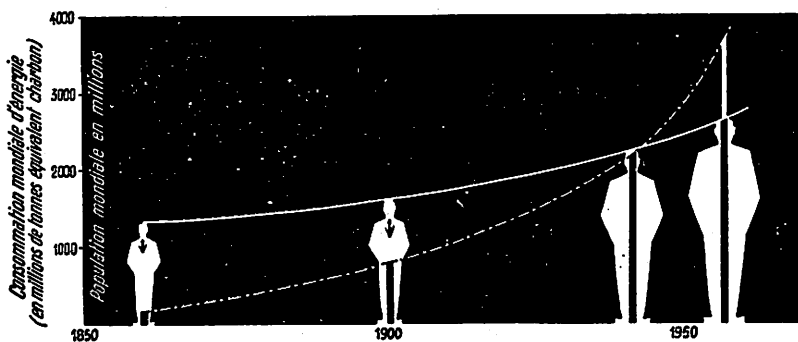
Fig. 498.

se font même plus rares dans les pays sous-développés; elles ne se produisent jamais dans les pays industrialisés. D'ailleurs, la possibilité d'utiliser les vastes champs de l'océan pour la culture d'algues comestibles écarte toute crainte de voir l'humanité manquer un jour de nourriture.

Un problème analogue se pose actuellement pour l'énergie. Pendant des millénaires, l'homme ne dispose que de son énergie musculaire pour exécuter ses travaux. Sans doute, parvient-il assez rapidement à utiliser quelques élémentaires sources d'énergie : les vents, les chutes d'eau, les animaux... Dans de telles conditions, l'homme peut à peine produire un peu plus d'énergie qu'il ne lui en faut pour assurer sa propre subsistance. Les puissants du moment tirent profit du travail d'un grand nombre d'hommes réduits à l'esclavage.

L'homme s'affranchit en partie du travail musculaire lorsque James Watt (ingénieur anglais : 1736-1819) construit la machine à vapeur. S'affranchir du travail musculaire, tel est toujours le but que poursuit l'homme : la production d'énergie par tête d'habitant atteint actuellement, dans nos pays, l'équivalent du travail d'une centaine d'esclaves.

Au temps de Watt, le charbon sert à alimenter quelques méchants appareils de chauffage et quelques modestes fabriques de fer. Le pétrole et le gaz naturel sont connus mais inemployés. Jusqu'en 1913, époque à laquelle entrent en scène le pétrole et ses dérivés, le charbon est la source, presque unique, de l'énergie. Depuis lors, l'extraction du pétrole gagne du terrain à une allure étonnante tandis que l'extraction du bon vieux charbon n'augmente qu'à une cadence bien plus lente que celle d'autrefois : au cours des années s'échelonnant de 1952 à 1958, la production du pétrole a aug-



Evolution comparée de la population mondiale et de la consommation mondiale d'énergie.

Fig. 499.

menté de 38 % (800 millions de tonnes en 1957 contre 580 millions de tonnes en 1952) alors que la production du charbon n'a augmenté que de 8 % (1450 millions de tonnes en 1957 contre 1340 millions de tonnes en 1952). Or, la valeur calorifique du pétrole est de 50 % supérieure à celle du charbon. Au point de vue énergétique, la production du pétrole est, par rapport à la production du charbon, passée de 65 % en 1952 à 83 % en 1957 : il n'est pas douteux que, dans les années à venir, la production du pétrole égalera, puis dépassera la production du charbon. (En Belgique et au Grand-Duché de Luxembourg, la part du pétrole est cependant plus

faible : en 1955, le pétrole intervient pour six millions de tonnes sur un total énergétique équivalent à trente-huit millions de tonnes de charbon).

Il existe une troisième source importante d'énergie : l'énergie hydraulique. En Europe Septentrionale (Norvège, Suède...) et en Europe Méridionale (Espagne, Midi de la France, Suisse, Italie, Autriche...), de nombreuses centrales électriques utilisent la « houille blanche » c'est-à-dire l'énergie potentielle de l'eau accumulée par des barrages. A côté de ces sources d'énergie, les centrales éoliennes, centrales utilisant la force du vent, les centrales géothermiques, centrales utilisant la vapeur d'eau sous pression qui se dégage en certains points du sous-sol italien, et les centrales marémotrices, centrales (en projet) mettant à profit la force des marées, ne représentent qu'un appoint négligeable. Quant à l'énergie humaine, elle n'intervient plus que pour 3 % dans l'énergie utilisée dans le monde.

Au cours de ces cent dernières années, nos besoins d'énergie se sont accrûs au taux composé de 2 % l'an : la consommation totale d'énergie dans le monde en millions de tonnes équivalent-charbon est passée de 150 en 1850 à 800 en 1900, à 2160 en 1940, à 3686 en 1955 (fig. 499). Deux causes cumulent leurs effets pour produire cet accroissement régulier de nos besoins d'énergie : la population du globe ne cesse de croître à un rythme rapide (500 millions en 1700, 1000 millions en 1800, 1600 millions en 1900, 2600 millions en 1952, 2800 millions en 1958) (fig. 499) et la consommation d'énergie par tête d'habitant augmente d'année en année (la consommation d'énergie électrique est passée de 400 kWh en 1952 à 600 kWh en 1957).

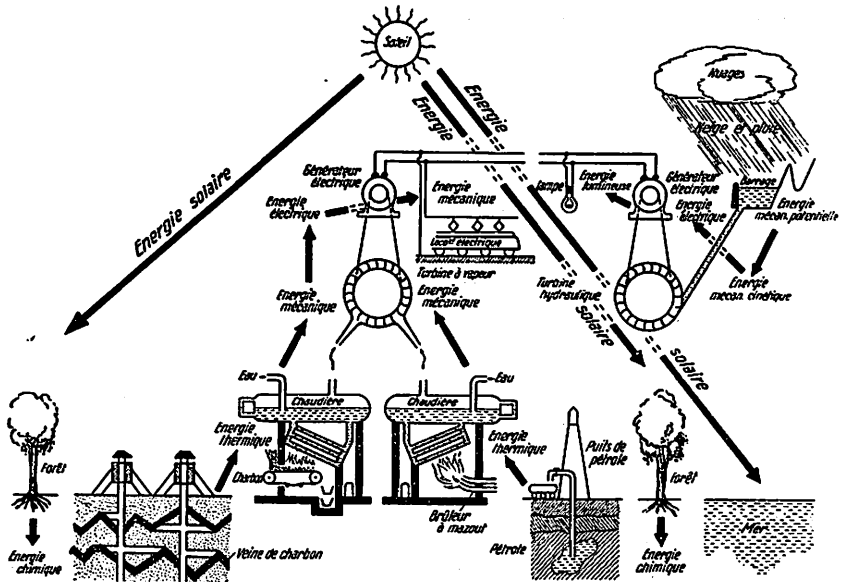


Fig. 500.
Sources d'énergie.

La nécessité de couvrir les besoins en énergie se fait particulièrement sentir en Europe. « A la veille de la seconde guerre mondiale, les six pays de la C.E.C.A. (Communauté Européenne Charbon-Acier) importaient

en moyenne 5 % de leurs besoins; ils en importent aujourd'hui 33 % et, dans 10 ans, si aucun facteur n'intervient, ils en importeront 40 %. Encore faut-il observer que ces importations massives ne correspondent pas à une situation énergétique brillante ! Tant s'en faut. Le Français consomme par an 2,4 T. d'équivalent-charbon, l'Allemand 3,5 T., le Belge 3,8 T., alors que l'Anglais consomme 4,9 T. et l'Américain 8,3 T (*).

L'énergie importée provient, en ordre principal, des Etats-Unis pour le charbon, du Moyen-Orient pour le pétrole. La C.E.C.A. prévoit que, sans intervention de l'énergie nucléaire, il lui faudra importer 189 millions de tonnes d'équivalent-charbon en 1965, 303 millions de tonnes en 1975 alors qu'elle n'avait importé que 83 millions de tonnes en 1955.

Energie chimique et énergie hydraulique ont suffi jusqu'à présent à couvrir les besoins mondiaux. Or, charbon et pétrole sont des carburants fossiles c'est-à-dire des carburants qui se sont accumulés dans les terrains au cours des périodes géologiques antérieures : ils s'épuisent mais ne se remplacent pas. Pouvons-nous procéder comme les populations de l'Amérique Centrale qui brûlaient leurs forêts mais négligeaient de planter des arbres ? Comme ont disparu les civilisations pré-colombiennes, notre civilisation périrait faute de combustibles. Comment, dès lors, satisfaire nos impérieux besoins d'énergie, d'autant plus impérieux que notre civilisation poursuit deux buts essentiels : élever le standing de vie des nations civilisées et sortir de l'arrière les pays sous-développés ? Le problème de l'énergie se pose donc, à l'heure actuelle, dans des conditions analogues à celles dans lesquelles se posait, il y a deux siècles, le problème de la nourriture.

Le problème de l'énergie est actuellement résolu : on utilisera l'énergie atomique. La formidable libération d'énergie que produit la fission des atomes d'uranium, de thorium... constitue la source nouvelle d'énergie. L'uranium que l'on pourrait extraire du sol à un prix raisonnable est évalué à un million de tonnes. A l'allure d'utilisation actuelle, un million de tonnes d'uranium équivaut à 17500 millions de tonnes de charbon : l'énergie à extraire de l'uranium correspond à vingt fois l'énergie à extraire des réserves disponibles en charbon et en pétrole. Et il existe dans l'univers au moins autant, si pas trois fois autant, de thorium que d'uranium. Longtemps avant que les ressources en uranium et en thorium ne soient épuisées, l'homme aura trouvé un procédé d'utilisation industrielle de la fusion des atomes de deutérium. La fusion libère une énergie bien plus considérable que la fission. La fusion se produit dans le soleil dont l'activité énergétique s'est maintenue constante depuis des millions d'années; elle est utilisée dans la bombe H où elle est amorcée par une bombe à fission; elle sera probablement mise à profit sur une vaste échelle dans les centrales nucléaires futures. Fournissant 1 g de deutérium par 22,5 kg, l'eau des océans constituera l'inépuisable source d'énergie des âges à venir.

Grâce aux efforts des savants, le problème de l'énergie, à l'instar du problème de la nourriture, d'une humanité en expansion est virtuellement résolu. Ce sont, en définitive, les hommes de laboratoire qui assurent à la condition humaine un standing de vie de plus en plus élevé.

(*) Extrait d'un article de M. Louis Armand, « Demain », juin 1957.

CHAPITRE IV.

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES EN OPTIQUE.

§ 1. THÉORIES DE LA LUMIÈRE.

399. HYPOTHÈSE CORPUSCULAIRE ET HYPOTHÈSE ONDULATOIRE. — Les théories sur la nature intime de la lumière se ramènent à deux types distincts : l'hypothèse de l'émission et l'hypothèse des ondu-
lations.

D'après l'hypothèse corpusculaire (Newton, Laplace), la lumière serait constituée d'un flux de particules matérielles émises par la source lumineuse et se propageant en ligne droite dans un milieu homogène. Cette théorie, qui interprète d'une façon satisfaisante les phénomènes de réflexion, de réfraction et de dispersion, n'explique pas les phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation.

D'après l'hypothèse ondulatoire (Huygens, Young, Fresnel), la lumière serait constituée d'un mouvement vibratoire qui se propage dans un milieu élastique, impondérable, remplissant le vide, imprégnant tous les corps : l'éther. Cette théorie permet d'interpréter les phénomènes de l'optique géométrique : réflexion, réfraction, ainsi que les phénomènes périodiques en optique : interférence, diffraction, polarisation, que nous allons étudier.

400. THÉORIES MODERNES DE LA LUMIÈRE.

Théorie électromagnétique de Maxwell. — Maxwell remarque (n° 240) que le rapport entre les unités électromagnétiques et les unités électrostatiques est égal à $3 \cdot 10^{10}$ fois l'unité de vitesse c'est-à-dire égal à la vitesse de la lumière dans le vide. Ce résultat permit à Maxwell d'attribuer à la lumière une nature électromagnétique : le rayon lumineux consisterait en des variations périodiques d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre. Cette hypothèse de Maxwell était d'autant plus remarquable que les ondes électromagnétiques ne furent découvertes par Hertz que vingt ans plus tard.

Théorie électronique de Lorentz. — La théorie électromagnétique de Maxwell ne donne aucune explication sur l'origine de la lumière. Lorentz admet que la lumière est produite par les oscillations électroniques dues à la gravitation des électrons autour du noyau atomique.

Théorie quantique de Planck. — La théorie électronique de Lorentz présente cependant une difficulté : les électrons satellites devraient, à cause de leur gravitation continue autour du noyau atomique, émettre continuellement de l'énergie rayonnante; ils devraient donc sans cesse se rapprocher du noyau et finir par y tomber. L'atome serait dans ces conditions un système instable. Cette difficulté disparaît avec la théorie des quanta. Pour expliquer la répartition de l'énergie dans le spectre du corps noir (n° 432), Planck admet que les échanges d'énergie entre la matière et le rayonnement ne peuvent se produire que par unités discrètes, que par quantités finies appelées quanta d'énergie. Le quantum d'énergie rayonnante est égal à $h\nu$, ν désignant la fréquence du rayonnement et h étant une constante universelle (constante de

Planck) égale à $6,55 \cdot 10^{-27}$ erg . seconde.

$$q = h\nu$$

Selon la théorie quantique, il n'y a pas émission d'énergie rayonnante lorsque l'électron gravite sur une orbite; il y a émission d'un rayonnement lorsque l'électron « saute » d'une orbite sur une autre. La théorie de Planck, permet d'expliquer l'émission des raies spectrales, l'effet photo-électrique, la variation de la longueur d'onde par diffusion (effet Compton), l'émission du rayonnement X, la variation de la chaleur spécifique avec la température, etc.

Einstein, adoptant la théorie de Planck, attribue au rayonnement une structure corpusculaire (théorie des quanta de lumière ou photons).

401. MÉCANIQUE ONDULATOIRE DE DE BROGLIE. — La conception d'Einstein s'adapte difficilement à l'explication des phénomènes d'interférence, de diffraction et de polarisation. La théorie électromagnétique et la théorie quantique nous apparaissent à première vue comme deux doctrines opposées. Dans sa mécanique ondulatoire, de Broglie admet que tout rayonnement corpusculaire est accompagné d'un phénomène ondulatoire comme tout phénomène ondulatoire est accompagné d'un rayonnement corpusculaire. Tout corpuscule de masse m animé d'une vitesse v est accompagné d'une onde de fréquence ν telle que

$$mv = h\nu$$

h désignant la constante de Planck. La lumière serait donc constituée de grains d'énergie (photons) pilotés par un train d'ondes (ondes pilotes). Cette hypothèse concilie les aspects quantique et ondulatoire du rayonnement; elle a reçu une vérification expérimentale remarquable par la découverte de la diffraction des électrons.

§ 2. VITESSE DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

402. GÉNÉRALITÉS. — Avec quelle vitesse la lumière se propage-t-elle dans l'air? Descartes admettait que la vitesse de propagation de la lumière est infinie. En 1657, Galilée tenta de déterminer expérimentalement la vitesse de propagation de la lumière; il n'obtint toutefois aucun résultat parce qu'il ne disposait que de moyens rudimentaires pour mesurer de courts intervalles de temps. En 1672, l'astronome danois Roemer déduit d'observations astronomiques que la vitesse de la lumière est de 308 000 km/s. Les expériences directes de Fizeau et de Foucault, réalisées au siècle dernier, fournissent, pour la vitesse de la lumière dans l'air, une valeur très voisine de 300 000 km/s. Les déterminations, faites avec une très grande précision par Michelson (1921-1927), assignèrent à la lumière la vitesse de 299 796 km/s, avec une approximation de 4 km. Nous admettrons la valeur très approchée de 300 000 km/s.

Rendons-nous compte de l'énormité de cette vitesse en notant que la lumière met 8 min 17 s pour parcourir les 150 000 000 km qui séparent la Terre du Soleil, qu'elle ferait huit fois le tour de la Terre en une seconde.

403. MÉTHODE DE FIZEAU. — Pour déterminer expérimentalement la vitesse de propagation de la lumière par la méthode de Fizeau, on mesure le temps nécessaire à la lumière pour aller d'un point A à un point B et pour revenir du point B au point A (fig. 501). Au point A est installée une roue dentée R dont la largeur des creux est égale à la largeur des dents ; cette roue est animée d'un mouvement de rotation uniforme. Au point B est installé, parallèlement à la roue dentée, un miroir plan M. Une source lumineuse S envoie un faisceau lumineux parallèle qui se réfléchit sur une lame à faces parallèles L inclinée à 45°. Selon la position de la roue, le faisceau lumineux est arrêté par une dent ou passe à travers un creux. Le faisceau lumineux qui passe à travers un creux effectue le trajet AB, se réfléchit sur le miroir plan et effectue le trajet BA. Si, à son retour, le faisceau lumineux rencontre un creux, il passe à travers ce creux : un observateur, placé derrière la roue dentée, perçoit la lumière réfléchie par le miroir. Si, à son retour, le faisceau lumineux rencontre une dent, il est arrêté : l'obser-

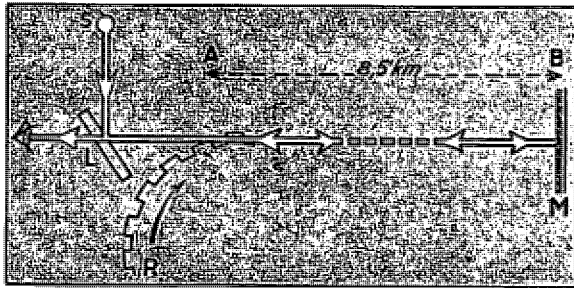


Fig. 501.

vateur ne perçoit pas la lumière réfléchie par le miroir. L'expérience consiste à communiquer à la roue dentée une vitesse de rotation telle que le faisceau lumineux lancé à travers un creux soit arrêté, à son retour, par la dent suivant immédiatement ce creux. Le temps mis par la lumière pour effectuer le trajet AB et BA est égal au temps mis par une dent pour se substituer au creux qui la précède.

Fizeau qui fit sa détermination dans les conditions expérimentales suivantes : distance AB : 8 500 mètres, roue de 500 dents et 500 creux, observa la première éclipse lorsque la roue dentée faisait 18 tours par seconde. Le temps mis par la lumière pour franchir les 17 kilomètres du trajet aller et retour est donc égal à 1/18 000 seconde, ce qui assigne à la lumière une vitesse de :

$$V = \frac{17}{\frac{1}{18\,000}} = 306\,000 \text{ km/s.}$$

404. MÉTHODE DE FOUCAULT. — Un faisceau lumineux issu de la source S est reçu par un miroir plan M qui est animé d'un mouvement de rotation uniforme très rapide (800 tours à la seconde) autour de l'axe C (fig. 502). Pour certaines positions du miroir plan M, le faisceau lumineux réfléchi sur ce miroir tombe sur un miroir concave *m* dont le centre de courbure se trouve sur l'axe de rotation C du miroir plan. Le faisceau lumineux

après réflexion sur le miroir concave, revient sur lui-même et frappe le miroir plan. Mais pendant le temps que met la lumière pour effectuer le trajet aller et retour COC, le miroir plan a tourné d'un angle α . Le faisceau de retour CS', réfléchi sur le miroir plan, fait avec le faisceau incident un angle 2α (n° 18). Le déplacement SS' du rayon réfléchi CS' par rapport au rayon incident SC est déterminé à l'aide d'une lunette. Supposons, pour fixer les idées, que la distance SC soit égale à 6 mètres, que la distance CO soit égale à 5 mètres et que le déplacement SS' mesuré à l'aide de la lunette soit égal à 2 millimètres.

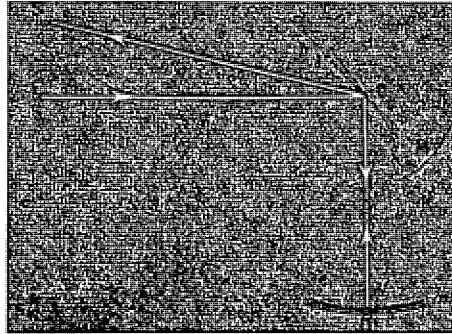


Fig. 502.

L'angle 2α que font entre eux le faisceau incident et le faisceau de retour vaut :

$$2\alpha = \frac{0,2}{600} = \frac{1}{3\,000} \text{ rad.}$$

L'angle α $\left(\frac{1}{6\,000} \text{ radian} \right)$ dont a tourné le miroir plan M est décrit en un temps t tel que

$$t = \frac{1}{6\,000 \cdot 800 \cdot 2\pi} = \frac{1}{30\,000\,000} \text{ s.}$$

Ce temps est le temps mis par la lumière pour parcourir le trajet aller et retour COC; on en déduit aisément la vitesse de la lumière :

$$v = \frac{e}{t}; \quad v = 2 \cdot 500 \cdot 30\,000\,000 = 30\,000\,000\,000 \text{ cm/s} \text{ ou } 300\,000 \text{ km/s.}$$

C'est par la méthode du miroir tournant que Foucault parvint à mesurer la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau. En disposant entre le miroir plan M et le miroir concave m un long tube rempli d'eau, Foucault montra que la lumière se propage dans l'eau avec une vitesse de 225 000 km/s.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Dans l'expérience de Fizeau décrite au n° 403, il se produit une première éclipse du faisceau réfléchi pour une vitesse de rotation de la roue de 18 tours par seconde. Pour quelles vitesses de rotation se produisent la seconde, la troisième éclipses ?

SOLUTION. — La première éclipse se produit lorsque le faisceau réfléchi rencontre la dent qui suit immédiatement le creux laissant passer le faisceau incident. Si la vitesse de rotation de la roue est doublée, le faisceau réfléchi rencontre un creux et est visible par l'observateur. Si la vitesse de rotation de la roue est triplée, le faisceau réfléchi rencontre une dent : il se produit une seconde éclipse. Le même raisonnement conduit à la conclusion qu'il se produit une 3^e, une 4^e,... éclipses lorsque la vitesse de rotation de la roue devient 5, 7,... fois plus grande. La seconde éclipse se produit lorsque la vitesse de rotation de la roue est de 54 tours/s; la troisième éclipse se produit lorsque la vitesse de rotation de la roue est de 90 tours/s.

2. Avec le dispositif de Foucault tel qu'il est décrit au n° 404, on veut déterminer la vitesse de propagation de la lumière dans l'eau. Dans ce but, on intercale un tube (longueur : 3 m) rempli d'eau sur le trajet CO (5 m) de la lumière. On observe que, dans ces conditions le déplacement SS' qui était 2 mm dans l'air devient 2,4 mm. Déduire le rapport des vitesses de propagation de la lumière dans l'eau et dans l'air.

SOLUTION. — Pour un trajet de 10 m dans l'air (trajet CO, aller et retour) le déplacement observé est 2 mm, le déplacement par mètre de trajet dans l'air est donc 0,2 mm. Dans l'expérience avec le tube d'eau, le trajet CO, aller et retour, comporte :

un trajet de 4 m dans l'air; déplacement correspondant : $0,2 \cdot 4 = 0,8$ mm.

un trajet de 6 m dans l'eau : déplacement correspondant : $2,4 - 0,8 = 1,6$ mm.

Or, le trajet de 6 m dans l'air aurait produit un déplacement de 1,2 mm.

Les déplacements, étant proportionnels aux angles α , sont proportionnels aux temps de parcours; ils sont donc inversement proportionnels aux vitesses de propagation.

$$\frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{air}}} = \frac{SS'_{\text{air}}}{SS'_{\text{eau}}} = \frac{1,2}{1,6}; \quad \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{air}}} = \frac{3}{4}$$

§ 3. DISPERSION DE LA LUMIÈRE.

X

405. DÉCOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE. —

Étudions le phénomène de dispersion de la lumière blanche signalé précédemment (n° 43). Un faisceau de lumière solaire, après réfraction dans un prisme, donne sur un écran une large bande colorée que nous appelons spectre solaire. Nous y distinguons les sept couleurs suivantes que nous indiquons par ordre de déviation croissante : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet. Le passage d'une de ces couleurs à l'autre est graduel.

Le spectre obtenu en remplaçant la lumière solaire par la lumière blanche d'un arc électrique ou d'une lampe à incandescence est identique au spectre solaire.

Pour interpréter le phénomène de la dispersion de la lumière blanche, Newton a admis que la lumière blanche est constituée par la réunion d'une infinité de lumières ou de radiations monochromatiques dont l'indice de réfraction croît d'une façon continue du rouge au violet. Lors de leur passage dans le prisme, les rayons constituant le faisceau de lumière

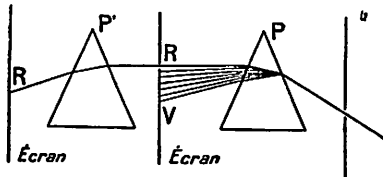


Fig. 503.

blanche subissent des déviations en rapport avec leurs réfrangibilités respectives; les rayons émergent du prisme seront donc étalés.

406. SIMPLICITÉ DES COULEURS ÉLÉMENTAIRES. —

Les couleurs du spectre solaire ne sont-elles plus elles-mêmes décomposables?

Expérience. — Recevons sur un écran percé d'une fente le spectre solaire que nous donne un prisme P (fig. 503). Disposons derrière l'écran un prisme P' de façon que les arêtes des deux prismes soient parallèles entre elles. Faisons tourner le prisme P de manière à amener successivement les couleurs du spectre à passer par la fente de l'écran et, par conséquent, à tomber sur le prisme P'. Nous observons que chacune de ces couleurs est déviée vers la base du prisme P' mais n'est plus décomposée.

Conclusion. — Les couleurs du spectre solaire sont simples c'est-à-dire indécomposables en couleurs différentes.

407. SYNTHÈSE DE LA LUMIÈRE BLANCHE. — Puisque la lumière blanche peut être décomposée en une infinité de couleurs, ne pourrions-nous pas produire de la lumière blanche en réunissant les lumières simples fournies par le prisme?

Expériences. — 1. Un premier prisme A disperse un faisceau parallèle de lumière blanche; un second prisme B, identique au premier, ramène au parallélisme le faisceau divergent coloré obtenu par le prisme A (fig. 504). Recevons le faisceau émergent sur un écran, l'image obtenue est blanche.

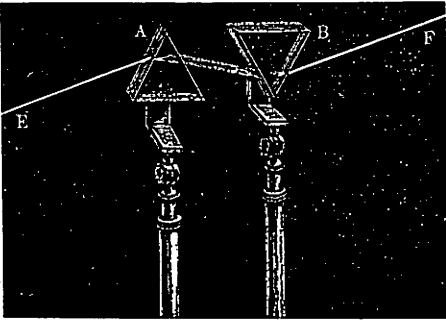


Fig. 504.

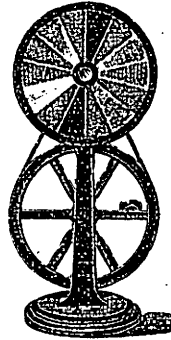


Fig. 505

2. Recevons un faisceau de lumière blanche dispersée par un prisme sur une lentille convergente ou sur un miroir concave : les faisceaux des radiations simples se concentrent sensiblement en un même point. Si en ce point nous plaçons un écran, nous y observons une tache blanche brillante.

3. Animons d'un mouvement de rotation rapide un disque de carton divisé en un grand nombre de secteurs présentant plusieurs fois dans leur ordre de succession les sept couleurs principales du spectre (fig. 505) : par l'effet de la persistance des impressions rétiniennes, la surface du disque nous apparaît blanche ou tout au moins d'un blanc grisâtre.

Conclusion. — La superposition des lumières simples qui composent la lumière blanche donne de la lumière blanche.

408. COULEURS COMPLÉMENTAIRES.

Expérience. — Recevons sur une lentille convergente le faisceau dispersé du spectre dont nous avons préalablement masqué une région : le rouge, par exemple. Nous n'obtenons plus sur l'écran une image blanche mais une image vert bleuâtre.

Conclusion. — La couleur vert bleuâtre qu'il faut ajouter à la couleur rouge pour obtenir la couleur blanche est dite **couleur complémentaire** de la couleur rouge.

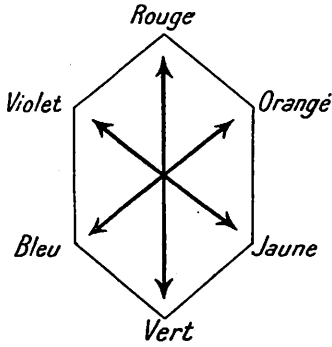


Fig. 506.

Réciproquement la couleur rouge est la couleur complémentaire de la couleur vert bleuâtre. La combinaison de deux couleurs simples en proportions convenables peut donc produire la couleur blanche. La figure 506 indique les couples de couleurs simples complémentaires.

409. COULEURS DES CORPS.

— a) **Par diffusion.** — La couleur d'un corps opaque, éclairé par de la lumière blanche, dépend de son action sur les couleurs du spectre. Un corps opaque qui diffuse toutes les lumières du spectre est blanc. Un corps opaque qui absorbe toutes les lumières du spectre est noir. Un corps opaque qui, éclairé par de la lumière blanche, renvoie par diffusion la lumière rouge, bleue, verte,... (ou un mélange de lumières donnant le rouge, le bleu, le vert,...) en absorbant la lumière complémentaire est rouge, bleu, vert,...

b) **Par transmission.** — Un corps transparent qui se laisse traverser par toutes les lumières constituant la lumière blanche est incolore. *Exemples* : le verre, l'eau, la calcite,...

Un corps transparent qui ne se laisse traverser que par certaines radiations est coloré. *Exemples* : les verres colorés par l'oxyde cuivreux éteignent le vert, ils apparaissent rouges (couleur complémentaire du vert); les verres colorés par l'oxyde de fer éteignent le rouge, ils apparaissent verts (couleur complémentaire du rouge).

Un corps transparent qui réfléchit la partie de la lumière qu'il ne transmet pas présente deux couleurs complémentaires : l'une par réflexion et l'autre par transmission. *Exemple* : une mince couche de fuchsine déposée sur une lame de verre est verte par réflexion et rouge par transmission.

410. COULEURS DES CORPS ÉCLAIRÉS PAR LA LUMIÈRE COLORÉE. — La couleur d'un corps ne dépend pas seulement de la nature de ce corps mais aussi de la couleur de la lumière qui l'éclaire.

Une fleur, qui en lumière blanche est bleue, promené dans le spectre solaire conserve sa couleur dans le bleu mais apparaît noire dans le rouge. Dans une pièce d'appartement éclairée par la lumière jaune du sodium, les objets jaunes restent jaunes, les objets blancs apparaissent jaunes, les objets d'autres couleurs prennent des teintes formées par la combinaison du jaune et du noir; on remarquera que la lumière jaune du sodium donne aux objets des teintes livides.

411. INFRA-ROUGE ET ULTRA-VIOLET. — Les rayons constituant le spectre solaire n'ont pas seulement des propriétés optiques mais également des propriétés calorifiques et chimiques.

Lorsqu'on promène dans le spectre la cuvette recouverte de noir de fumée d'un thermomètre sensible, on constate une élévation de température en allant du violet au rouge. Cette élévation de température se poursuit au delà du rouge. L'énergie calorifique des radiations situées au delà du rouge c'est-à-dire des **radiations infra-rouges** est très grande (expérience de Melloni au moyen d'un prisme en sel gemme).

Un papier au chlorure d'argent placé dans le spectre noircit à la suite d'une réduction du sel d'argent. Les radiations du spectre ont donc également une activité chimique. L'activité chimique qui commence avec la radiation verte persiste pour des radiations situées au delà de la radiation violette c'est-à-dire pour les **radiations ultra-violettes**.

Le spectre visible (du rouge au violet) ne constitue donc qu'une partie du spectre. Au deçà du rouge, les radiations ont surtout des propriétés calorifiques; au delà du violet, les radiations ont des actions chimiques.

§ 4. PHÉNOMÈNES D'INTERFÉRENCE ET DE DIFFRACTION.

1. INTERFÉRENCE.

412. EXPÉRIENCE DES MIROIRS DE FRESNEL.

En chambre noire, disposons devant une fente S fortement éclairée par une lumière monochromatique (rouge, par exemple) deux miroirs plans M

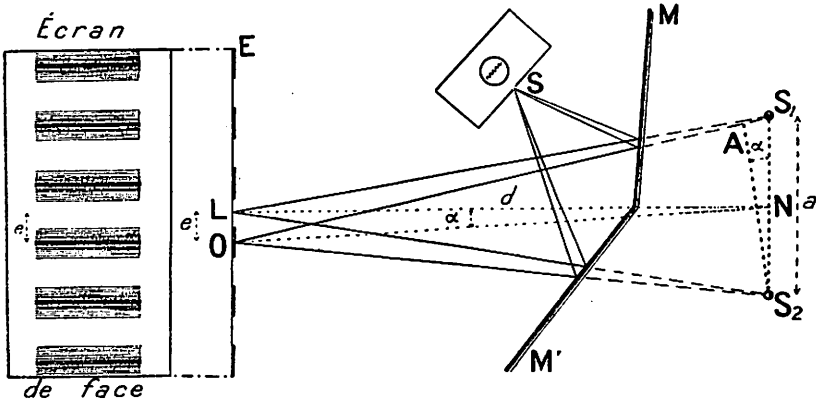


Fig. 507

et M' faisant entre eux un angle voisin de 180° : les miroirs donnent de la source S deux images virtuelles, très voisines S_1 , et S_2 (fig. 507). Ces deux images jouent le rôle de sources lumineuses synchrones. Les rayons lumineux

réfléchis par les miroirs M et M' se comportent comme s'ils étaient issus des sources S₁ et S₂; ils sont dans les conditions exigées pour interférer puisqu'ils sont constitués de mouvements vibratoires identiques (n° 312). Sur un écran E, placé devant les miroirs, nous observons une série de franges alternativement brillantes et obscures, le passage d'une frange brillante à une frange obscure étant, du reste, graduel.

L'existence des franges d'interférence permet de conclure que la lumière est un phénomène périodique.

413. MESURE DES LONGUEURS D'ONDE. — L'expérience des miroirs de Fresnel permet de mesurer les longueurs d'onde des vibrations lumineuses. À cet effet, disposons l'écran E parallèlement à la droite joignant les sources lumineuses S₁ et S₂. Désignons par *d* la distance séparant le point N, milieu de la droite S₁S₂, du point L, milieu de la frange brillante centrale; par *e* la distance séparant le point L, milieu de la frange brillante centrale, du point O, milieu de la première frange obscure; par *a* la distance séparant les sources S₁ et S₂. Joignons le point O aux points S₁ et S₂, décrivons avec le point O comme centre et avec OS₂ comme rayon l'arc de cercle S₂A et menons ON. En raison de la très faible valeur de la distance *e* relativement à la distance *d*, nous pouvons assimiler l'arc de cercle S₂A à une droite perpendiculaire à la droite ON. Nous pouvons donc considérer égaux les angles AS₂S₁ et ONL puisque leurs côtés sont pratiquement perpendiculaires l'un à l'autre. Désignons par *α* les angles AS₂S₁ et ONL. Au point O, la différence de marche des ondes émises par les points S₁ et S₂ vaut (n° 315) :

$$\Delta = S_1O - S_2O; \Delta = S_1A; \Delta = \frac{\lambda}{2}$$

Or, l'angle *α* étant très petit :

$$\frac{\lambda}{2} = a \alpha \quad \text{et} \quad e = d \operatorname{tg} \alpha = d \alpha$$

Nous en tirons :

$$\lambda = \frac{2ae}{d}$$

La connaissance des distances *d*, *a* et *e* (cette dernière se mesure à l'aide d'une lunette à micromètre) nous permet de déterminer la longueur d'onde de la lumière employée.

En opérant successivement avec des lumières rouge, jaune, bleue, la distance *e* qui sépare les franges diminue : la longueur d'onde des couleurs spectrales diminue donc progressivement du rouge au violet.

Ces longueurs d'onde s'expriment en microns (*μ*), en millimicrons (*mμ*) ou en unités Angström (Å). Le micron vaut 10⁻⁴ cm, le millimicron vaut 10⁻⁷ cm et l'unité Angström vaut 10⁻⁸ cm. Citons les longueurs

d'onde moyennes des couleurs spectrales que nous exprimons en Angströms pour éviter l'emploi de décimales :

Rouge	6 850 Å	Vert	5 200 Å
Orangé	6 000 Å	Bleu	4 700 Å
Jaune	5 600 Å	Violet	4 100 Å

414. VIBRATIONS LUMINEUSES. — Puisque nous connaissons la vitesse de propagation de la lumière dans le vide et les longueurs d'onde des diverses radiations lumineuses, nous pouvons calculer les fréquences des vibrations lumineuses. Nous savons en effet que la fréquence ν est donnée par la relation (n° 305) :

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Nous aurons donc pour la lumière verte, la vitesse de la lumière dans le vide étant de $3 \cdot 10^{10}$ cm/s pour toutes les radiations :

$$N = \frac{3 \cdot 10^{10}}{5\,200 \cdot 10^{-8}} = 577 \cdot 10^{12} \text{ vibrations par seconde.}$$

415. EXPÉRIENCE DE FRESNEL EN LUMIÈRE BLANCHE.

Les expériences précédentes nous ont montré que la distance qui sépare les franges dépend de la couleur utilisée... Si la source lumineuse est une source de lumière blanche, les franges colorées, correspondant aux diverses radiations, empiètent les unes sur les autres : nous observons sur l'écran une frange centrale brillante blanche et deux séries de franges comprenant les diverses couleurs du spectre.

En lumière blanche, on ne peut observer de frange obscure puisque l'extinction d'une radiation d'une couleur fait apparaître la couleur complémentaire.

416. ANNEAUX DE NEWTON.

Expérience. — Disposons sur une lame de verre parfaitement plane une lentille sphérique plan-convexe de très faible courbure. Eclairons le dispositif réalisé à l'aide d'un faisceau lumineux monochromatique; nous observons une tache noire centrale et une série d'anneaux alternativement brillants et obscurs (fig. 508).

Explication. — La différence de marche entre le rayon réfléchi sur la lame plane et le rayon réfléchi sur la face inférieure de la lentille est sensiblement égale au double de l'épaisseur de la couche d'air

séparant les points de réflexion (fig. 509). Or, l'épaisseur de la couche d'air comprise entre la lentille et la lame augmente lentement du centre à la périphérie. Il existe donc des circonférences où le retard



Fig. 508.

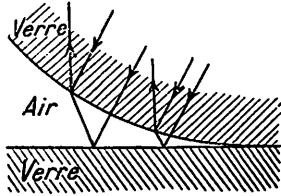


Fig. 509.

entre les rayons réfléchis est de $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots (2k + 1) \lambda/2$ (anneaux obscurs) alternant avec des circonférences où le retard entre les rayons réfléchis est de $\lambda, 2\lambda, \dots 2k\lambda/2$ (anneaux brillants).

Remarque. — Puisqu'au centre l'épaisseur de la couche d'air est nulle, nous devrions observer une tache lumineuse au lieu d'une tache obscure. Fresnel a montré que la réflexion sur la face de séparation air-verre se fait avec perte d'une demi-longueur d'onde. Puisque les deux rayons réfléchis sont en complète discordance, la tache centrale doit être obscure.

En lumière blanche, nous observons une tache noire centrale et une série d'anneaux irisés.

417. COLORATION DES LAMES MINCES. — L'expérience des anneaux de Newton explique la coloration des lames minces transparentes : bulles de savon, ailes d'insectes, mince couche de pétrole sur l'eau, etc... Les radiations réfléchies sur chaque face de la lame interfèrent : les colorations très variées que nous observons en lumière blanche s'expliquent par des variations dans l'épaisseur de la lame.

2. DIFFRACTION.

418. PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION. — L'expérience montre que les ondes se diffractent d'autant plus fortement que leur longueur d'onde est plus grande. Les ondes hertziennes dont la longueur d'onde est supérieure à 100 mètres se diffractent fortement et ne peuvent donc être dirigées; les ondes hertziennes dont la longueur d'onde est inférieure à 1 mètre se diffractent faiblement et peuvent être dirigées. Nous pouvons, par conséquent, prévoir que la lumière, étant donnée la faible valeur des longueurs d'ondes lumineuses, ne se diffracte que très faiblement : c'est pourquoi nous avons observé que la propagation de la lumière est rectiligne.

L'expérience suivante montre cependant la diffraction de la lumière. Eclairons au moyen d'une fente lumineuse monochromatique la pointe d'une aiguille ou un fil tendu; nous observons sur un écran des franges d'interférence dites franges de diffraction; les bords de l'obstacle deviennent, en vertu du principe de Huygens (n° 318), des sources lumineuses identiques, très voisines.

419. RÉSEAU DE DIFFRACTION. — Une lame de verre qui porte une série de traits parallèles équidistants et serrés (200 traits par millimètre, par exemple) constitue un **réseau de diffraction**. Ces réseaux sont obtenus en traçant les traits à l'aide d'une machine à diviser.

Expérience. — Recevons sur un écran l'image f d'une fente lumineuse F monochromatique donnée par une lentille convergente L (fig. 510). Disposons ensuite un réseau R entre la fente et la lentille : de part et d'autre de l'image primitive f , nous observons, à des distances égales, des images de premier ordre f_1 , des images de second ordre f_2 ,... Ces images sont dues à l'interférence des faisceaux diffractés par les traits du réseau.

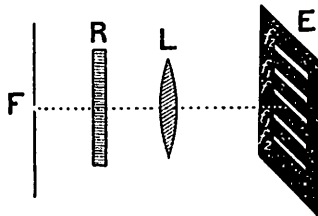


Fig. 510.

En lumière blanche, nous observons de part et d'autre d'une frange centrale blanche des spectres de premier, de second,...

Explication. — La lumière incidente tombe normalement sur le réseau R : les divers traits F_1, F_2, F_3, \dots constituant des fentes deviennent des sources synchrones et envoient de la lumière dans toutes les directions (fig. 511).

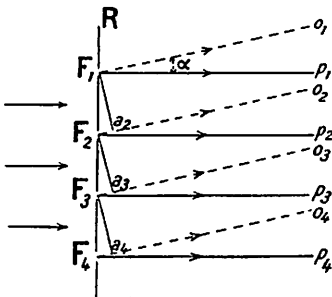


Fig. 511.

Les rayons parallèles $F_1p_1, F_2p_2, F_3p_3, \dots$, perpendiculaires au réseau, ne présentent entre eux aucune différence de marche. Ils convergent au foyer de la lentille et y forment la frange centrale brillante.

Les rayons parallèles $F_1o_1, F_2o_2, F_3o_3, \dots$, obliques au réseau, présentent l'un sur l'autre une différence de

marche Δ constante : $\Delta = F_2a_2 = F_3a_3 = F_4a_4 = \dots = k \sin \alpha$, k désignant la constante du réseau c'est-à-dire la distance entre deux traits consécutifs. Ils convergent dans le plan focal de la lentille. Selon que la différence de marche Δ est égale à $\lambda, 2\lambda, \dots$ ils y forment les franges brillantes de premier, de second,...

420. MESURE DES LONGUEURS D'ONDE. — La mesure de l'écartement des franges de diffraction données par un réseau permet de déterminer, avec une très grande précision, la longueur d'onde de la lumière employée.

La frange de premier ordre se produit pour une différence de marche Δ telle que :

$$\Delta = k \sin a = \lambda.$$

Or, l'angle a étant petit, il vient :

$$ka = \lambda.$$

La mesure de la longueur d'onde se résume à une détermination de l'angle a que fait la direction du faisceau non diffracté avec la direction du faisceau formant la frange brillante de premier ordre.

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Un réseau, comportant 200 traits par millimètre, est éclairé par la lumière jaune du sodium. Déterminer la longueur d'onde de cette lumière sachant que la direction du faisceau non diffracté fait un angle de 0,1178 rad avec la direction du faisceau formant la frange de premier ordre.

SOLUTION. — La longueur d'onde de la lumière jaune du sodium est donc :

$$\lambda = ka; \lambda = \frac{1}{200} \cdot 0,1178 = 0,000589 \text{ mm ou } 5890 \text{ \AA}.$$

2. Une source de lumière monochromatique éclaire deux fentes, F_1 et F_2 , parallèles et très fines, distantes de 1 mm. Sur un écran E , parallèle au plan des fentes et situé à 3 m de ce plan, on observe un système de franges d'interférence.

a) Lorsqu'on opère en lumière rouge, la distance de la première frange à la frange centrale brillante est 0,9 mm; déterminer la longueur d'onde de la lumière rouge.

b) Que devient la distance entre ces deux franges si on utilise une lumière bleue de fréquence $6 \cdot 10^{14}$?

La source de lumière est placée symétriquement par rapport aux fentes.

SOLUTION. — a) En adoptant les notations du n° 412 et de la figure 457 où les sources S_1 et S_2 sont remplacées par les fentes F_1 et F_2 , il vient :

$$S_1S_2 = F_1F_2 = a = 0,1 \text{ cm}; \quad d = NL = 300 \text{ cm}; \quad e = LO = 0,09 \text{ cm}.$$

Par le même raisonnement qu'au n° 413, on obtient :

$$\lambda = \frac{2ae}{d}; \quad \lambda = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 0,09}{300} = 0,00006 \text{ cm ou } 6000 \text{ \AA}.$$

b) La longueur d'onde correspondant à la fréquence $6 \cdot 10^{14}$ vaut :

$$\lambda = \frac{v}{\nu}; \quad \lambda = \frac{3 \cdot 10^{10}}{6 \cdot 10^{14}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm ou } 5000 \text{ \AA}.$$

En appliquant la formule $\lambda = \frac{2ae}{d}$, il vient:

$$e = \frac{\lambda d}{2a}; \quad e = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 300}{2 \cdot 0,1} = 0,075 \text{ cm ou } 0,75 \text{ mm}.$$

X

§ 5. SPECTROSCOPIE.

Analyser une lumière, c'est en rechercher les diverses radiations constitutives. Dans ce but, on produit la dispersion de la lumière à analyser au moyen d'un prisme ou d'un réseau.

421. SPECTROSCOPE (fig. 512). — Le spectroscope se compose essentiellement d'un

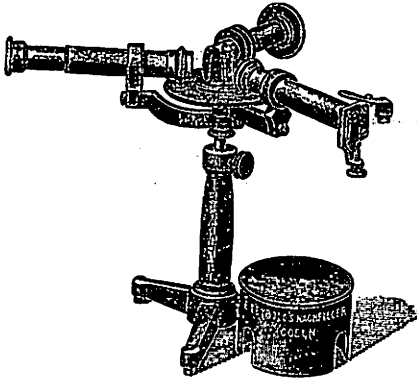


Fig. 512.

prisme dispersif placé sur un plateau central, d'un collimateur et d'une lunette (fig. 513). La fente F du collimateur, dont on peut faire varier l'ouverture au moyen d'une vis, est placée au foyer d'une lentille convergente L_1 ; éclairée par la lumière à analyser, la fente envoie sur le prisme un faisceau parallèle. Le faisceau qui émerge du prisme tombe sur la lentille convergente L_2 de la lunette et converge

dans le plan focal de cette lentille où il produit un spectre réel.

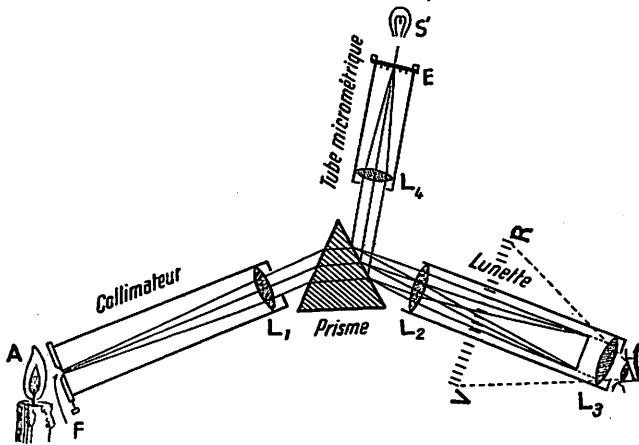


Fig. 513.

Ce spectre est examiné au moyen de la lentille convergente L_3 qui fonctionne comme loupe. Une échelle micrométrique sur verre E , disposée au foyer de la lentille L_4 du tube micrométrique, est éclairée par une petite lampe électrique S' ; le faisceau issu de cette source est reçu dans la lunette après réflexion sur le prisme : l'image de l'échelle micrométrique se superpose au spectre.

Remarquons qu'il existe des spectroscopes à vision directe constitués de plusieurs prismes accolés de manière à supprimer la déviation sans nuire à la dispersion.

422. SPECTRES D'ÉMISSION. — Toutes les sources lumineuses donnent des spectres appelés spectres d'émission.

Les spectres d'émission des solides ou liquides incandescents sont continus c'est-à-dire sont formés sans discontinuité d'une gamme de radiations. L'étendue du spectre d'émission varie avec la température de la source : les radiations rouges apparaissent à basse température (450°), les radiations violettes à température élevée (1 500°). L'arc électrique, le manchon Auer, la lampe électrique à incandescence donnent des spectres continus complets (Planche Spectres). Les spectres d'émission des vapeurs ou gaz incandescents sont discontinus c'est-à-dire sont formés d'un certain nombre de raies

brillantes séparées par des espaces obscurs. La position de ces raies brillantes est caractéristique de la nature du gaz ou de la vapeur qui émettent les radiations.

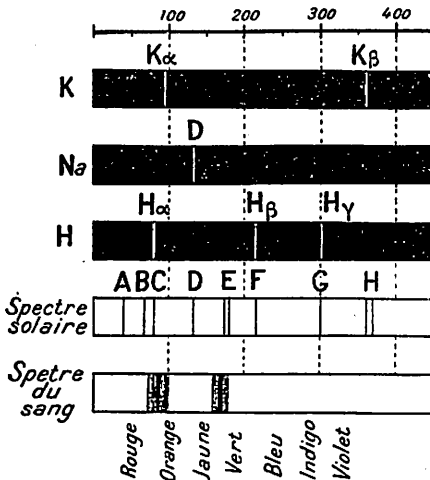


Fig. 514.

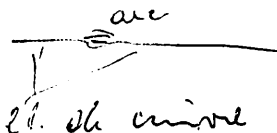
La figure 514 donne les spectres d'émission du potassium, du sodium, de l'hydrogène. La planche, intitulée Spectres, donne les spectres de raies de l'hydrogène, du sodium, du potassium, du néon et le spectre de bandes de l'azote. Les vapeurs et les gaz incandescents émettent donc une lumière constituée de quelques radiations bien déterminées.

Nous obtenons des spectres de gaz ou de vapeurs métalliques : a) en vaporisant dans la flamme incolore d'un bec Bunsen sel du métal à étudier (spectre de flamme); b) en faisant passer l'arc électrique entre deux charbons dont l'un renferme un sel du métal à étudier (spectre d'arc) ; c) en faisant passer l'étincelle électrique dans un tube, tube de Geissler, (fig. 515) renfermant sous pression réduite la vapeur ou le gaz à étudier (spectre d'étincelle).



Fig. 515

*donner à la
de la lampe
et voir
cette émission
de la lampe*



Remarquons que les gaz incandescents peuvent, dans certaines conditions, fournir un spectre continu.

423. SPECTRES D'ABSORPTION. — Si nous disposons, sur le trajet d'un faisceau de lumière blanche comprenant toutes les radiations, des milieux transparents : verres colorés, solutions colorées, nous observons que le spectre présente de larges bandes noires correspondant aux radiations absorbées.

Le spectre d'absorption d'un solide ou d'un liquide, que l'on obtient en faisant traverser le corps par de la lumière blanche, présente des bandes noires dont la position caractérise la substance disposée sur le trajet du faisceau de lumière blanche. La figure 514 donne le spectre d'absorption du sang humain.

Le spectre d'absorption d'une vapeur ou d'un gaz est un spectre de lumière blanche strié de raies noires dont la position coïncide avec la position des raies brillantes du spectre d'émission.

424. RENVERSEMENT DES RAIES.

Expérience. — Disposons devant la fente du collimateur d'un spectroscope une source lumineuse constituée d'un fil de platine incandescent : nous obtenons un spectre continu. Interposons entre le fil de platine et la fente du collimateur la flamme d'un bec Bunsen colorée en jaune par du sodium ; nous observons dans le jaune du spectre une raie noire qui occupe exactement la position qu'occupe la raie jaune dans le spectre d'émission.

Conclusion. — La vapeur de sodium a absorbé la radiation qu'elle peut émettre. Ce phénomène constitue un remarquable phénomène de résonance.

425. GRADUATION DU SPECTROSCOPE EN LONGUEURS D'ONDE. — Pour graduer le spectroscope en longueur d'onde, on éclaire successivement la fente du collimateur avec des sources de lumière constituées de quelques radiations dont les longueurs d'onde ont été déterminées par la méthode des interférences. On repère sur l'échelle micrométrique la position de chacune de ces radiations. On trace la courbe longueurs

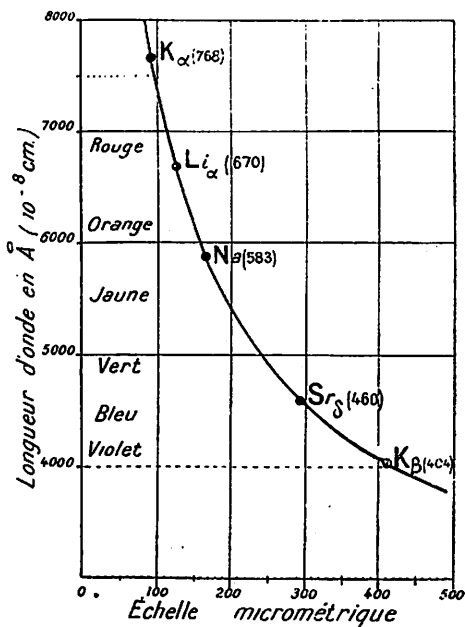


Fig. 516.

On repère sur l'échelle micrométrique la position de chacune de ces radiations. On trace la courbe longueurs

d'onde-divisions du micromètre en portant en ordonnées les longueurs d'onde et en abscisses les divisions du micromètre (fig. 516). On peut, dès lors, à l'aide de cette courbe déterminer les longueurs d'onde des différentes radiations émises par une source lumineuse quelconque.

426. SPECTRE DE L'HYDROGÈNE. — Le spectre de l'hydrogène présente cinq raies visibles désignées respectivement par : H_α (6563 Å), H_β (4861 Å), H_γ (4341 Å), H_δ (4102 Å) et H_ϵ (3646 Å). Les fréquences de ces différentes raies sont données par une relation empirique découverte par Balmer en 1885 :

$$\nu = 329 \cdot 10^{13} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

dans laquelle n prend les valeurs suivantes : 3 pour la raie H_α , 4 pour la raie H_β , 5 pour la raie H_γ , 6 pour la raie H_δ , 7 pour la raie H_ϵ . Comme nous le verrons bientôt, le spectre de l'hydrogène est d'une importance théorique considérable.

La relation empirique de Balmer ne fut expliquée par la théorie qu'en 1916 par le physicien danois Bohr.

Nous savons que l'atome d'hydrogène est constitué d'un noyau central de charge $+e$ et d'un électron de charge $-e$ (n° 209). Cet électron gravite autour du noyau, sur une orbite circulaire. La mécanique classique prévoit pour l'électron un nombre infini d'orbites. Bohr admet que, parmi ces orbites, seules les orbites satisfaisant aux conditions de la théorie des quanta (n° 400) sont accessibles à l'électron. Ces orbites de rayon déterminé que peut décrire l'électron constituent des orbites stationnaires (fig. 517). Contrairement à ce que laisse prévoir la théorie électromagnétique, l'électron qui décrit une orbite stationnaire n'émet pas d'énergie rayonnante. Sur les orbites stationnaires de rayons $r_1, r_2, r_3, \dots, r_m, \dots, r_n, \dots$ que nous caractérisons par un numéro d'ordre appelé nombre quantique correspondant respectivement, pour le système noyau-électron, des énergies déterminées $E_1, E_2, E_3, \dots, E_m, \dots, E_n, \dots$

Or, le calcul conduit aux lois suivantes :

1° Le rayon d'une orbite stationnaire est proportionnel au carré du nombre quantique qui y correspond.

Les rayons des orbites stationnaires valent donc respectivement :

$$r_1 \quad 2^2 r_1 \quad 3^2 r_1 \dots \quad m^2 r_1 \dots \quad n^2 r_1 \dots$$

Le rayon r_1 de la première orbite vaut : $0,53 \cdot 10^{-8}$ cm. Nous admettrons que cette orbite, pour laquelle le système noyau-électron possède une énergie minimum, correspond à l'état normal de l'atome d'hydrogène.

2° L'énergie de l'électron est inversement proportionnelle au carré du nombre quantique qui correspond à l'orbite décrite par l'électron.

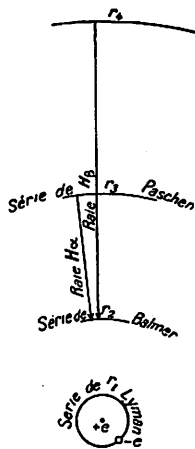
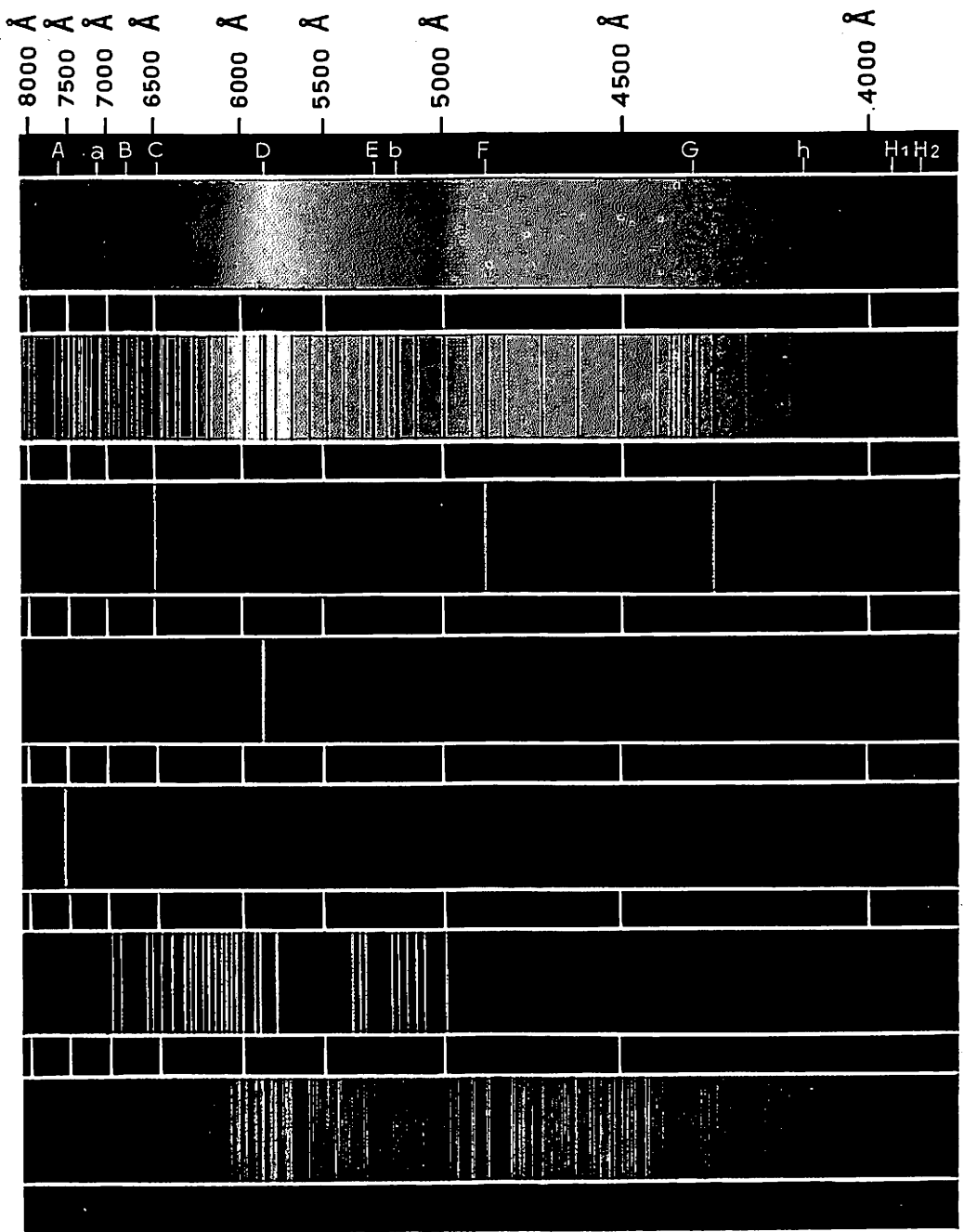


Fig. 517.



SPECTRES

- I: Spectre continu.
- II: Spectre du soleil avec les principales raies d'absorption de Fraunhofer.
- II, IV, V, VI: Spectres de raies de l'hydrogène (H), du sodium (Na), du potassium (K), du néon (Ne).
- VII: Spectres de bandes de l'azote (N₂).

Les énergies de l'électron sur les orbites stationnaires valent donc respectivement :

$$- E_1 \quad - \frac{E_1}{2^2} \quad - \frac{E_1}{3^2} \quad \dots \quad - \frac{E_1}{m^2} \quad \dots \quad - \frac{E_1}{n^2}$$

Lorsque l'électron passe d'une orbite stationnaire sur une autre, l'atome subit une variation d'énergie ΔE ; il se produit simultanément une émission ou une absorption d'un rayonnement monochromatique c'est-à-dire d'un rayonnement de longueur d'onde déterminée. La fréquence de ce rayonnement est donnée par la relation : $\Delta E = h\nu$ (principe de la conservation de l'énergie et théorie des quanta).

D'où :

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$

Le passage de l'électron de l'orbite extérieure n à l'orbite plus profonde m s'accompagne d'une diminution d'énergie ΔE telle que :

$$\Delta E = E_n - E_m; \Delta E = \frac{E_1}{m^2} - \frac{E_1}{n^2}; \Delta E = E_1 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Ce passage est accompagné de l'émission d'un rayonnement monochromatique qui est caractérisé par une raie du spectre. La fréquence de ce rayonnement vaut :

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}; \nu = \frac{E_1}{h} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

ou

$$\nu = K \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

En faisant dans cette relation $m = 2$, nous retrouvons la relation empirique de Balmer.

Nous sommes donc à même d'expliquer le mécanisme de l'émission des raies spectrales de l'hydrogène. A l'état normal, l'électron de l'atome d'hydrogène gravite sur l'orbite stationnaire de rayon r_1 . Sous l'action de la décharge électrique, les électrons sont rejetés de leur orbite normale r_1 sur les orbites r_2, r_3, r_4, \dots . Ces électrons en retombant des orbites r_3, r_4, r_5, \dots (orbites de départ) sur l'orbite r_2 (orbite commune d'arrivée) donnent naissance aux raies spectrales de la série de Balmer. En retombant des orbites r_3, r_4, \dots sur l'orbite r_1 , ils donnent naissance à une série de raies situées dans l'ultra-violet (série de Lyman); en retombant des orbites r_4, r_5, r_6, \dots sur l'orbite r_3 , ils donnent naissance à une série de raies situées dans l'infrarouge (série de Paschen). Ce qui est tout à fait remarquable dans la théorie de Bohr, c'est le fait que les différentes raies prévues par la théorie ont été successivement découvertes.

427. APPLICATIONS DE LA SPECTROSCOPIE. — Les applications de la spectroscopie sont nombreuses. Nous nous bornerons à en signaler les principales.

a) **Étude des sources lumineuses.** — L'étude des spectres émis par les sources lumineuses nous renseigne tant au point de vue de la

constitution de la lumière émise que de la répartition de l'énergie dans le spectre.

b) **Analyse chimique.** — La position des raies caractérisant la nature de la substance, une méthode excessivement sensible d'analyse chimique qualitative et même quantitative est basée sur l'examen des spectres d'émission. Les spectres d'absorption sont utilisés pour la recherche des matières colorantes, pour l'identification des taches de sang, etc...

c) **Analyse des corps célestes.** — Les renseignements que nous possédons sur la constitution chimique du Soleil, des planètes, des étoiles nous sont uniquement fournis par l'analyse spectrale de la lumière émise par ces astres. Le spectre solaire est un spectre continu haché de nombreuses raies obscures (fig. 514) : la position de ces raies nous permet de reconnaître la présence dans l'atmosphère solaire d'hydrogène, de sodium, de potassium, ... (renversement des raies). L'analyse spectrale permet de plus d'évaluer la vitesse avec laquelle un astre s'approche ou s'écarte de la Terre (déplacement des raies par effet Döppler-Fizeau), la température des astres (largeur des raies),...

§ 6. POLARISATION.

428. DOUBLE RÉFRACTION. — Si nous posons sur une feuille imprimée un rhomboèdre (solide à six faces losanges) de calcite appelée spath d'Islande, nous remarquons que les caractères recouverts par le rhomboèdre sont dédoublés (fig. 518). Comment expliquer ce phénomène ? Recevons, à cet effet, un faisceau parallèle monochromatique normalement à l'une des faces d'un rhomboèdre de spath, nous observons que le faisceau incident SI se divise, lors de son entrée dans le cristal, en deux faisceaux (fig. 519). Le faisceau réfracté IO sort sans déviation en obéissant ainsi aux lois ordinaires de la réfraction, il est appelé **faisceau ordinaire**; le faisceau réfracté IE n'obéit pas aux lois ordinaires de la réfraction, il est appelé **faisceau extraordinaire**. Le faisceau incident SI subit donc la **double réfraction**. Si nous disposons un écran sur le trajet des faisceaux réfractés, nous y observons deux traces lumineuses ayant la forme de l'ouverture qui limite le faisceau incident.



Fig. 518.

Faisons tourner le cristal autour de l'axe IO, le faisceau ordinaire IO reste immobile tandis que le faisceau extraordinaire IE tourne autour du faisceau ordinaire (fig. 519). Ces deux faisceaux restent

cependant dans le plan passant par les petites diagonales AA' et BB'

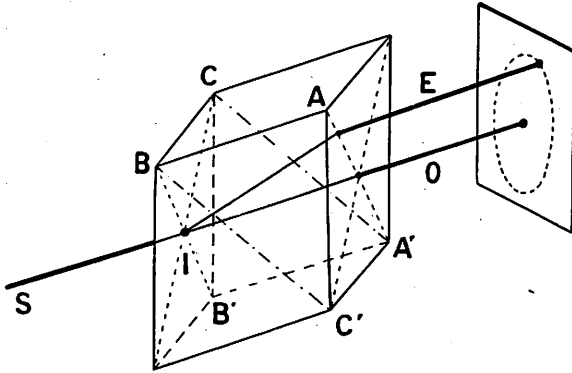


Fig. 519.

des faces d'entrée et de sortie du cristal; ce plan $AA'BB'$ définit le plan de section principale du cristal.

429. POLARISATION DE LA LUMIÈRE. — Ces faisceaux réfractés jouissent d'une propriété remarquable que nous allons étudier. A cet effet, nous utiliserons des prismes de Nicol appelés plus simplement **nicols** : le nicol est obtenu en sciant un cristal de spath suivant un plan $BCA'C'$ oblique par rapport au plan de section principale (fig. 519) et en recollant ensuite les deux fragments obtenus avec du baume de Canada.

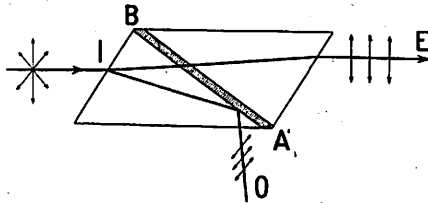


Fig. 520.

La figure 520 représente le plan de section principale d'un nicol. Ce nicol élimine le faisceau ordinaire O par réflexion totale sur le baume de Canada et se laisse traverser par le faisceau extraordinaire E .

Expérience. — Animons d'un mouvement rapide de rotation l'ex-

Expérience. — Faisons tomber un faisceau lumineux sur deux

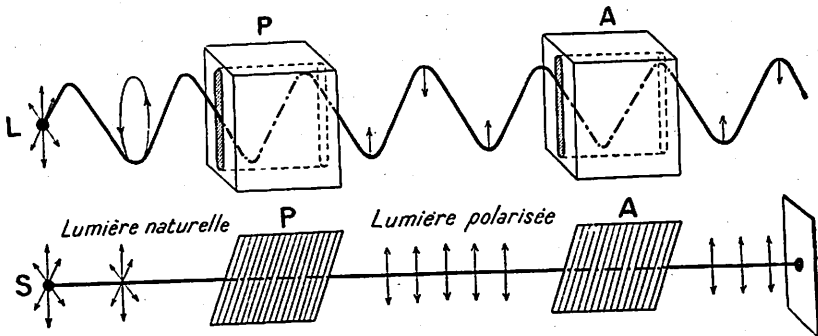


Fig. 521 et Fig. 522.

trémité L d'un tuyau de caoutchouc qui passe par deux fentes étroites P et A, disposées parallèlement : nous observons qu'au delà de la fente P le tuyau de caoutchouc est animé d'un mouvement vibratoire s'effectuant uniquement dans le plan des fentes (fig. 521).

Disposons la fente A perpendiculairement à la fente P; nous

nicols P et A dont les sections principales sont parallèles (nicols parallèles) : nous observons sur un écran une tache lumineuse (fig. 522).

Disposons les nicols P et A de manière que leurs sections princi-

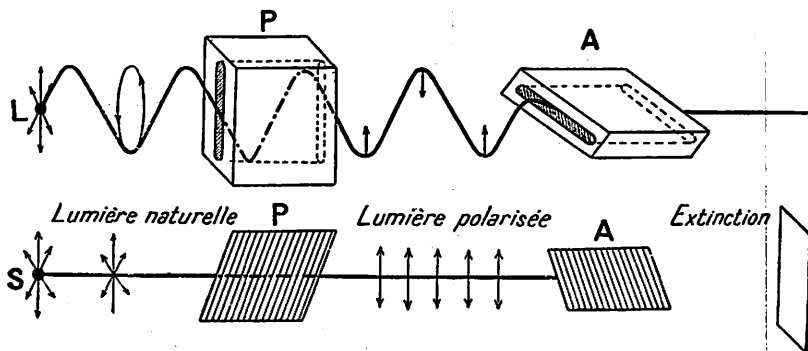


Fig. 523 et Fig. 524.

observons qu'au delà de la fente A, le tuyau de caoutchouc reste au repos (fig. 523).

Explications. — Avant la fente P, les vibrations du tuyau de caoutchouc se produisent dans tous les plans : nous disons que les ondes ne sont pas polarisées.

La fente P astreint les vibrations du tuyau de caoutchouc à se produire dans le plan de la fente. Les vibrations, par leur passage à travers la fente P, se sont polarisées c'est-à-dire se produisent dans un seul plan. La fente P est appelée **polariseur**.

Si la fente A est parallèle à la fente P, les vibrations du tuyau de caoutchouc, polarisées dans le plan de la fente A, passent librement à travers la fente A.

Si la fente A est perpendicu-

pales soient perpendiculaires (nicols croisés) ; nous n'observons aucune trace lumineuse sur l'écran (fig. 524).

Explications. — Avant son entrée dans le nicol P, les vibrations lumineuses se produisent dans tous les plans : nous disons que le faisceau lumineux n'est pas polarisé.

Le nicol P astreint les vibrations lumineuses à se produire dans un plan déterminé. Le faisceau lumineux qui émerge du nicol P est dit polarisé. Le nicol P est appelé **polariseur**.

Si les nicols P et A sont parallèles, les vibrations lumineuses, polarisées par le nicol P dans le plan de section principale passent librement à travers le nicol A.

Si les nicols P et A sont croi-

laire à la fente P, les vibrations du tuyau de caoutchouc polarisées par la fente P n'ont pas de composante dans le plan de la fente A : au delà de la fente A, les vibrations sont éteintes.

La fente A constitue un moyen de reconnaître si les ondes du tuyau de caoutchouc sont polarisées ou ne le sont pas; elle est appelée **analyseur**.

sés, les vibrations lumineuses polarisées par le nicol P n'ont pas de composante dans le plan de vibration du nicol A : au delà du nicol A, les vibrations lumineuses sont éteintes.

Le nicol A constitue un moyen de reconnaître si un faisceau lumineux est polarisé ou ne l'est pas; il est appelé **analyseur**.

Conclusion. — La lumière est constituée de vibrations transversales, car les phénomènes de polarisation ne peuvent se concevoir dans le cas de vibrations longitudinales.

430. POLARISATION ROTATOIRE. — Entre deux nicols à l'extinction, disposons une lamelle de quartz ou une solution de sucre : nous observons dans une lunette disposée à la suite de l'analyseur le rétablissement de la lumière. Nous obtenons à nouveau l'extinction en faisant tourner l'analyseur d'un certain angle.

Nous interprétons cette expérience en admettant que le quartz ou le sucre a fait subir une rotation au plan de vibration du faisceau polarisé. Le quartz et le sucre sont doués de **pouvoir rotatoire**.

La mesure du pouvoir rotatoire d'une solution sucrée à l'aide d'un polarimètre permet de déterminer la teneur en sucre de cette solution.

§ 7. ÉNERGIE LUMINEUSE.

1. PRODUCTION DE LUMIÈRE.

La lumière, qui est une forme de l'énergie, ne peut se produire qu'aux dépens d'une autre forme d'énergie : thermique, chimique, électrique... Il y a **incandescence** quand la lumière émise a une origine uniquement thermique ; il y a **luminescence** quand la lumière émise a, en tout ou en partie, une origine énergétique autre qu'une origine uniquement thermique.

***431. INCANDESCENCE - CORPS NOIR.** — Les lois auxquelles obéit le rayonnement par incandescence sont particulièrement simples.

Un « corps noir » est, pour les physiciens, un corps qui ne réfléchit, ne diffuse, ne transmet aucune radiation (pouvoir absorbant égal à l'unité). Une enceinte dont les parois sont imperméables à toute radiation réalise la condition du corps noir, car tout rayon pénétrant dans cette enceinte par une petite ouverture est intégralement absorbé par les parois (fig. 525).

Le rayonnement qui s'échappe par l'ouverture aménagée dans l'enceinte lorsque cette enceinte est portée à température élevée est le rayonnement du corps noir. Or, ce rayonnement ne dépend nullement de la nature chimique des parois de l'enceinte, ni de la nature chimique des substances (charbon, silice,...) qui se trouvent dans l'enceinte mais uniquement de la température de l'enceinte. Ce rayonnement constitue donc bien un rayonnement d'origine thermique.

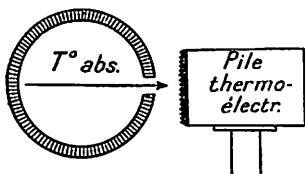


Fig. 525.

Loi de Stéphan. — Stéphan a montré expérimentalement que l'énergie totale émise en une seconde par un centimètre carré d'un corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de la température absolue.

$$E = \sigma T_a^4$$

σ désignant une constante égale à $5,7 \cdot 10^{-5}$ unités C. G. S.

Loi de Wien. — En examinant, à l'aide d'une pile thermo-électrique, d'un bolomètre (1) ou d'une cellule photo-électrique, la répartition de l'énergie dans le spectre émis par un corps noir, on remarque :

1°) Pour une température donnée, l'énergie se répartit sur les diverses radiations suivant une courbe à maximum (fig. 526).

2°) La longueur d'onde λ_m , qui correspond au maximum d'énergie, est inversement proportionnelle à la température absolue du corps noir. (Loi de Wien)

$$\lambda_m \cdot T_a = k$$

k étant une constante valant $2886 \cdot 10^4$ si la longueur d'onde est exprimée en Angström.

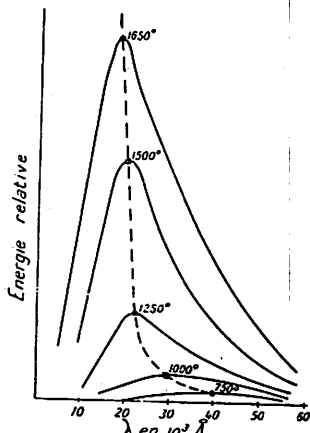


Fig. 526.

Les courbes de la répartition de l'énergie dans le spectre d'un corps noir peuvent être établies théoriquement en partant de la théorie des quanta de Planck. C'est d'ailleurs cette répartition de l'énergie dans le spectre du corps noir qui a conduit Planck à énoncer sa théorie.

Corps gris et corps noir. — La courbe représentant la répartition de l'énergie dans le spectre des corps qui constituent les sources lumineuses réelles est située au-dessous de la courbe du corps noir porté à la même température.

(1) Le bolomètre est essentiellement basé sur la variation de la résistance électrique d'un fil métallique avec la température (n° 149). La résistance électrique d'un fil de platine noirci au noir de fumée varie en fonction de l'énergie rayonnante absorbée.

Si la source lumineuse a un pouvoir absorbant qui ne varie pas avec la longueur d'onde, la courbe de cette source ressemble à la courbe du corps noir à un point tel que la longueur d'onde λ_m , correspondant au maximum du pouvoir émissif, est la même pour les deux corps. Le corps qui constitue la source lumineuse est dit **corps gris**; *exemple* : le charbon.

Si la source lumineuse a un pouvoir absorbant qui varie avec la longueur d'onde, la courbe de cette source est déformée. Le corps qui constitue la source lumineuse est dit **corps coloré**; *exemple* : le manchon Auer.

***432. LUMINESCENCE.** — Il existe de nombreux cas de luminescence. Nous citerons :

1^o) La **photoluminescence** provoquée par la lumière. Certaines substances, après avoir été exposées à la lumière, émettent un rayonnement lumineux lorsqu'on les place dans l'obscurité. La durée de la luminescence varie suivant la nature de la substance considérée : si elle est appréciable, la substance est dite **phosphorescente** (sulfures de zinc, de cadmium, de calcium); si elle est limitée à une fraction de seconde, la substance est dite **fluorescente** (platino-cyanure de baryum, spath fluor, verre d'urane, solution de fluorescéine).

2^o) La **chimiluminescence** provoquée par une réaction chimique: l'oxydation lente du phosphore, la putréfaction du bois sont des exemples de chimiluminescence.

3^o) L'**électroluminescence** due à une décharge électrique; les applications de l'électroluminescence sont très nombreuses : tubes à gaz raréfiés, lampes à vapeurs de mercure.

4^o) La **bioluminescence** due à un organisme vivant : certains organismes inférieurs (champignons, algues, infusoires) produisent la phosphorescence de la mer, de la viande avariée, des feuilles mortes,... Tout le monde connaît les vers luisants (coléoptères).

2. TRANSFORMATION DE LUMIÈRE.

433. TRANSFORMATION DE LUMIÈRE. — L'énergie lumineuse peut produire des effets calorifiques, chimiques, mécaniques, électriques.

Effets calorifiques. — L'absorption d'un faisceau lumineux par un corps chauffe ce corps : un thermomètre dont la cuvette est recouverte de noir de fumée (grand pouvoir absorbant) indique une élévation de température lorsqu'il est placé dans un faisceau lumineux. Le bolomètre et la pile thermo-électrique de Melloni sont des applications de cet effet.

Effets chimiques. — La lumière peut agir soit comme catalyseur en déclanchant certaines réactions chimiques : synthèse du gaz chlorhydrique; soit comme véritable producteur de réactions en

apportant toute l'énergie nécessaire à ces réactions : noircissement des sels d'argent, production des hydrates de carbone par les plantes (élaboration chlorophyllienne), décoloration des tissus colorés.

Effets mécaniques. — La lumière peut produire un travail mécanique. L'expérience suivante le prouve suffisamment. Des particules de charbon excessivement fines (obtenues par calcination des spores de champignon) et des grains de poussière d'émeri sont mélangés dans une ampoule de verre, en forme de sablier, à l'intérieur de laquelle règne un vide très poussé. Lorsqu'on retourne le sablier, les poussières viennent s'accumuler dans le compartiment inférieur du sablier sans se séparer les unes des autres. Mais lorsqu'on éclaire le filet de poussières à l'aide d'une source lumineuse très intense (arc électrique), les poussières se séparent : les particules de charbon sont déviées vers la paroi par le faisceau lumineux tandis que les grains d'émeri plus lourds tombent sans subir de déviation. La lumière exerce donc sur les objets qu'elle éclaire une pression dite pression de radiation. C'est par cette pression de radiation que l'on s'explique la couronne de particules très ténues qui entoure le soleil, que l'on s'explique la queue des comètes.

Effets électriques. — Sous l'influence de la lumière, certains métaux (potassium, sodium, rubidium,...) émettent des électrons. Nous avons donné à ce phénomène le nom d'effet photoélectrique (n° 206).

La vitesse des électrons émis est très faible; elle ne dépend que de la fréquence de la radiation. Cette vitesse est fournie par la relation d'Einstein :

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - h\nu_0$$

Cette relation exprime que l'énergie cinétique $mv^2/2$ de l'électron projeté est égale à la différence entre l'énergie $h\nu$ de la radiation incidente et l'énergie $h\nu_0$ nécessaire pour arracher l'électron à l'atome. Il résulte de cette relation que l'arrachement de l'électron ne se produit que si la fréquence de la radiation incidente est supérieure à une fréquence limite ν_0 . Cette fréquence limite est caractéristique du métal irradié.

La relation d'Einstein a été vérifiée expérimentalement par Millikan.

3. PHOTOMÉTRIE.

434. INTENSITÉ LUMINEUSE. — a) **Définition.** — Considérons une source lumineuse ponctuelle émettant uniformément une quantité d'énergie lumineuse W en l'unité de temps.

Nous appellerons **intensité lumineuse** I de la source la quantité d'énergie lumineuse émise par seconde dans l'angle solide unitaire (stéradian).

Si la source distribue l'énergie lumineuse identiquement dans toutes les directions de l'espace, l'intensité lumineuse de la source est

$$I = \frac{W}{4\pi}$$

puisque l'angle solide recevant l'énergie lumineuse est $4\pi R^2/R^2$ ou 4π stéradians.

Si la source ne distribue pas l'énergie lumineuse identiquement dans toutes les directions de l'espace, l'intensité lumineuse de la source est la limite du rapport $\Delta W/\Delta\omega$ de l'énergie lumineuse ΔW émise dans l'angle solide $\Delta\omega$ à l'angle solide $\Delta\omega$.

$$I = \limite \left(\frac{\Delta W}{\Delta\omega} \right) \Delta\omega \rightarrow 0$$

Tel est le cas des lampes électriques à filament en zig-zag, lampes rayonnant plus d'énergie dans le plan horizontal que dans le plan vertical.

b) Unité. — L'unité d'intensité lumineuse est la **candela** (cd), soixantième partie de l'intensité lumineuse émise normalement à son plan par une surface d'un centimètre carré de corps noir porté à la température de fusion du platine (1769°).

Les étalons photométriques sont des lampes à incandescence.

435. FLUX LUMINEUX. — **a) Définition.** — Le flux lumineux φ émis par une source lumineuse ponctuelle dans l'angle solide ω est le produit de l'intensité lumineuse I de la source disposée au sommet de l'angle solide ω par l'angle ω .

$$\varphi = I\omega$$

b) Unité. — L'unité de flux est le **lumen** (lm), flux lumineux d'une source d'une candela dans l'angle solide unitaire.

Le flux lumineux total émis par une source ponctuelle d'une candela rayonnant identiquement dans toutes les directions vaut :

$$\varphi = 1 \cdot 4\pi; \varphi = 12,5 \text{ lumens ou } 1,25 \text{ décalumens.}$$

c) Remarque. — Puisque l'intensité lumineuse des lampes varie avec la direction, il est plus logique de caractériser les lampes par le flux total émis que par leur intensité lumineuse.

436. ÉCLAIREMENT. — **a) Définition.** — L'éclairement E d'une surface est le quotient par la surface S du flux lumineux φ reçu.

$$E = \frac{\varphi}{S}$$

b) Unité. — L'unité d'éclairement est le **lux (lx)**, éclairement produit par le flux lumineux d'un lumen uniformément réparti sur une surface d'un mètre carré.

c) Lois. — Première loi. — Considérons une source ponctuelle S d'intensité lumineuse I émettant identiquement l'énergie lumineuse dans toutes les directions d'un milieu homogène non absorbant. Le flux lumineux émis par la source en l'unité de temps vaut :

$$\varphi = 4\pi I.$$

L'éclairement de la surface sphérique située à une distance d de la source S vaut :

$$E = \frac{\varphi}{S}; \quad E = \frac{4\pi I}{4\pi d^2}; \quad E = \frac{I}{d^2}$$

L'éclairement d'une surface varie en raison inverse du carré de la distance de la source lumineuse à la surface.

Il est évident que cette loi, due à la divergence des rayons lumineux, ne s'applique pas à un faisceau parallèle. La diminution de l'éclairement avec la distance est, dans ce cas, très faible; elle est due uniquement à l'absorption : les phares en sont un exemple remarquable.

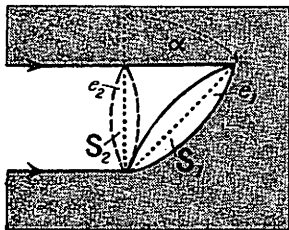


Fig. 527.

Deuxième loi. — Considérons une surface S_1 disposée obliquement par rapport aux rayons lumineux (fig. 527). L'énergie lumineuse reçue par cette surface S_1 est égale à l'énergie lumineuse reçue par la surface S_2 disposée perpendiculairement aux rayons lumineux et valant $S_1 \cos \alpha$ (α désignant l'angle que fait la surface S_1 avec la surface S_2 normale aux rayons lumineux). Si e_1 et e_2 désignent les éclairements des surfaces S_1 et S_2 , il vient successivement :

$$e_1 S_1 = e_2 S_2 = e_2 S_1 \cos \alpha \quad \text{et} \quad e_1 = e_2 \cos \alpha.$$

L'éclairement d'une surface oblique aux rayons lumineux est proportionnel au cosinus de l'angle fait par la surface avec la surface normale aux rayons lumineux.

437. PHOTOMÉTRIE. — La photométrie a pour but de comparer les intensités lumineuses de deux sources de lumière.

Photomètre de Bunsen. — Le photomètre de Bunsen se compose d'une feuille de papier blanc située entre deux miroirs inclinés S_1 et S_2

(fig. 528). La feuille de papier présente au centre une tache huilée L. On dispose les sources lumineuses à comparer de part et d'autre de la feuille de papier et on les déplace jusqu'à ce que la tache huilée cesse d'être visible par réflexion dans les miroirs : les éclairagements E de la tache d'huile sont alors identiques sur les deux faces. On relève les distances d et d' qui séparent respectivement les sources de l'écran. On peut donc écrire en désignant par I et I' les intensités lumineuses des sources :

$$e = \frac{I}{d^2} \quad \text{et} \quad e = \frac{I'}{d'^2}$$

d'où :

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}$$

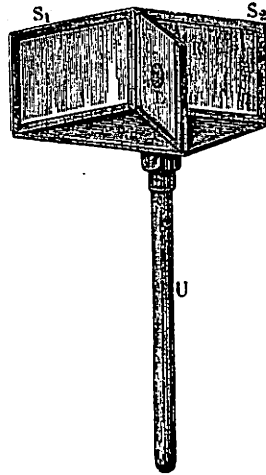


Fig. 528.

Cellule photoélectrique. — La cellule photoélectrique peut être utilisée, avec avantage, pour la comparaison des intensités lumineuses (n° 206).

EXEMPLES NUMÉRIQUES. — 1. Calculer l'énergie émise en une seconde par un centimètre carré d'un corps noir aux températures centigrades suivantes : 227°, 727°, 1227° et 1727°.

SOLUTION. — L'application de la relation : $E = \sigma T_a^4$ donne successivement :

$$E_{227^\circ} = 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 500^4 = 0,35 \text{ W.}$$

$$E_{727^\circ} = 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 1000^4 = 5,70 \text{ W.}$$

$$E_{1227^\circ} = 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 1500^4 = 28,50 \text{ W.}$$

$$E_{1727^\circ} = 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 2000^4 = 91,20 \text{ W.}$$

2. Calculer la température du Soleil, considéré comme corps noir, sachant que la longueur d'onde du maximum d'énergie rayonnée est 5000 Å.

$$T_a = \frac{k}{\lambda_m}; \quad T_a = \frac{2886 \cdot 10^4}{5000} = 5772^\circ \text{K.}$$

La température du Soleil est donc 5500° C.

3. En comparant au photomètre de Bunsen une lampe électrique L1 de 50 W à une lampe étalon L2 de 25 W et de 16 cd, on trouve que les distances des lampes au papier huilé sont, à égalité d'éclaircement, respectivement 60 cm et 40 cm. Déterminer : a) l'intensité lumineuse de la lampe L1; b) la consommation spécifique des deux lampes.

SOLUTION. — a)

$$\frac{I}{I'} = \frac{d^2}{d'^2}; \quad \frac{I}{16} = \frac{60^2}{40^2}; \quad I = 36 \text{ cd.}$$

L'intensité de la lampe L1 est de 36cd.

b) La consommation spécifique de la lampe L1 est de 1,39 (50/36) W/cd.
La consommation spécifique de la lampe L2 est de 1,56 (25/16) W/cd.

EXERCICES NUMÉRIQUES.

1. Un prisme en crown d'angle 60° dévie et disperse un faisceau de lumière blanche. Au minimum de déviation, l'angle de déviation des rayons rouges est $39^\circ 20'$, celui des rayons violets est $41^\circ 40'$. a) Déduire les indices de réfraction du crown pour les couleurs extrêmes du spectre visible. b) Déterminer la distance focale pour les rayons violets d'une lentille dont la distance focale est de 30 cm pour les rayons rouges. R : a) $n_r = 1,525$; $n_v = 1,550$. b) $f_v = 28,6$ cm.

2. Un faisceau parallèle de lumière blanche traverse un prisme d'angle 60° pratiquement au minimum de déviation pour tous les rayons. Les rayons réfractés sont recus sur une lentille achromatique de 5 dioptries. Le spectre réel qui est examiné avec une lentille-oculaire de 40 dioptries se forme à 25 cm de l'oculaire. On demande la longueur apparente l du spectre visible et la distance d séparant les deux lentilles sachant que les indices de réfraction du prisme pour les rayons extrêmes sont : $n_r = 1,52$ et $n_v = 1,55$. R : $l = 10,23$ cm et $d = 22,27$ cm

3. On utilise pour l'expérience des miroirs de Fresnel (n° 412) une lumière monochromatique dont la période est de $2 \cdot 10^{-15}$ s (lumière jaune). Quel doit être l'angle formé par les miroirs pour que la frange brillante centrale soit distante de sa voisine de 3 mm sachant que l'écran est situé à 1,75 m des images des sources et que la distance des images à la source est de 50 cm ? R : $179^\circ 58' 48''$.

4. Trouver l'équation qui exprime : a) l'énergie, exprimée en ergs, du quantum de lumière en fonction de la longueur d'onde exprimée en Angströms; b) la température centigrade correspondant à la fréquence du maximum d'énergie radiante dans le corps noir; c) l'énergie, exprimée en joules, en fonction de la température centigrade émise par un corps gris dont le rendement est 80 %. R : a) $q = 19,65 \cdot 10^{-9}/\lambda$; b) $T^\circ = 9,62 \cdot 10^{12} \nu - 273$; c) $4,56 \cdot 10^{-12} (T + 273)^4$.

5. Dans une mesure photométrique on doit placer une bougie considérée comme étalon à 20 cm et la lampe électrique à étudier à 80 cm pour obtenir l'égalité d'éclairément d'une surface. a) Déterminer l'intensité lumineuse de la lampe. b) Sachant que la bougie consomme 120 g de spermacéti à l'heure, que chaque gramme de spermacéti donne 3000 cal par combustion et que la lampe électrique a une puissance de 25 watts, indiquer laquelle des deux sources lumineuses a le meilleur rendement lumineux. R : a) 16 bougies; b) le rendement lumineux de la lampe électrique est 17 fois plus élevé que celui de la bougie.

LECTURE

LA PHOTOGRAPHIE EN COULEURS

La réalisation de photographies en couleurs et de films en couleurs est entrée dans le domaine de la pratique courante lorsque la prise de vue n'a plus exigé d'appareils spéciaux et que la genèse de toutes les couleurs s'est opérée dans un bain de développement unique.

1. **THÉORIE DES COULEURS.** — Les trois couleurs primaires du procédé trichrome sont

le bleu	correspondant aux rayons de 400 à 500 m μ de longueur d'onde		
le vert	»	»	de 500 à 600 m μ
le rouge	»	»	de 600 à 700 m μ

Combinées convenablement, ces trois couleurs primaires engendrent toutes les autres couleurs.

a) **Combinaisons additives** (Planche I, A). En salle obscure, dirigeons sur un écran blanc trois faisceaux lumineux colorés respectivement en bleu,

vert et rouge que nous fournissent trois projecteurs munis d'un filtre approprié et observons que

le mélange en quantités égales de rayons de deux couleurs primaires donne

bleu + vert → bleu-vert
bleu + rouge → pourpre ou magenta
vert + rouge → jaune

et que le mélange en quantités égales de rayons des trois couleurs primaires donne le blanc

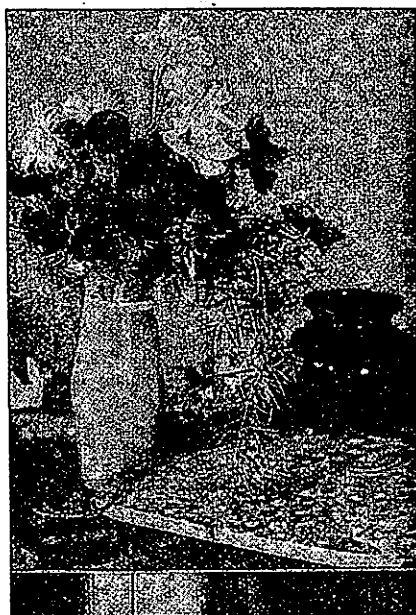
bleu + vert + rouge → blanc.

Le mélange de rayons lumineux est une combinaison additive : en effet, l'écran blanc réfléchit tous les rayons qu'il reçoit et l'œil enregistre la somme de tous ces rayons.



violet - bleu - vert - jaune - orange - rouge

Fig. 529. — Photographie prise avec une plaque ordinaire (d'après Franck)



violet - bleu - vert - jaune - orange - rouge

Fig. 530. — Photographie prise avec une plaque orthochromatique (d'après Franck).

b) **Couleurs complémentaires.** — Deux couleurs sont complémentaires l'une de l'autre lorsque le mélange, sous forme de rayons lumineux, de ces deux couleurs donne le blanc :

le jaune est complémentaire du bleu :

jaune + bleu → blanc;

le pourpre est complémentaire du vert :

pourpre + vert → blanc;

le bleu-vert est complémentaire du rouge :

bleu-vert + rouge → blanc.

c) **Combinaisons soustractives** (Planche I, B). — Les mélanges de colorants ne donnent pas les mêmes effets que les combinaisons additives des rayons colorés.

Un colorant absorbe une partie des couleurs du spectre : la couleur présentée par un colorant est celle qui reste après avoir retranché de la lumière incidente les couleurs absorbées par le colorant. Ainsi,

un colorant jaune n'absorbe que le bleu : le rouge et le vert non absorbés donnent la sensation du jaune;

un colorant bleu-vert n'absorbe que le rouge : le bleu et le vert non absorbés donnent la sensation du bleu-vert;

un colorant pourpre n'absorbe que le vert : le bleu et le rouge non absorbés donnent la sensation du pourpre.

Si nous mélangeons dans une éprouvette un colorant jaune et un colorant bleu-vert, le vert seul est transmis parce que les colorants jaune et bleu-vert absorbent respectivement le bleu et le rouge. La combinaison est dite soustractive parce que les colorants soustraient des couleurs.

Le mélange, sous forme de colorants, des couleurs complémentaires donne, en combinaison soustractive

pourpre + bleu-vert \rightarrow bleu
jaune + bleu-vert \rightarrow vert
jaune + pourpre \rightarrow rouge

Le mélange, sous forme de colorants, des trois couleurs complémentaires, donne le noir puisque tous les rayons incidents sont absorbés

pourpre + bleu-vert + jaune \rightarrow noir

En superposant en proportions différentes des encres des trois couleurs (jaune, pourpre, bleu-vert) utilisées en imprimerie trichrome, il se forme, outre les trois couleurs fondamentales, toute la gamme des autres tons (Planche I, C).

En photographie en couleurs, on utilise les combinaisons soustractives des trois couleurs complémentaires (jaune, pourpre, bleu-vert).

2. PRINCIPES DE LA PHOTOGRAPHIE EN COULEURS. — La photographie en couleurs résulte de deux découvertes : la sensibilisation optique et le développement chromogène.

a) **Sensibilisation optique.** — Le bromure d'argent, qui est jaune verdâtre, absorbe les radiations bleu-violet (de 400 à 500 m μ) : il n'est donc sensible qu'aux radiations bleu-violet.



violet - bleu - vert - jaune - orange - rouge

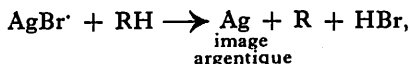
Fig. 531. — Photographie prise avec une plaque panchromatique (d'après Franck).

En 1873, Vogel observe que l'addition d'une matière colorante, le sensibilisateur optique, confère à une émulsion photographique une sensibilité aux radiations qui sont absorbées par cette matière colorante. Introduit à raison de 20 à 30 mg par kilogramme d'émulsion, le sensibilisateur optique, qui est absorbé à la surface de l'halogénure d'argent, absorbe une radiation lumineuse rouge ou une radiation lumineuse verte et transmet l'énergie radiante absorbée à l'halogénure d'argent qui, de ce chef, devient sensible à la radiation lumineuse rouge ou à la radiation lumineuse verte.

Les sensibilisateurs optiques actuellement utilisés confèrent à l'halogénure d'argent une sensibilité au vert (film orthochromatique), une sensibilité au vert et au rouge (film panchromatique), voire une sensibilité à l'infrarouge.

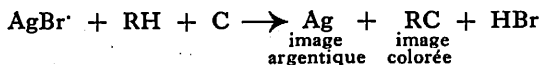
Les figures 529, 530 et 531 sont des photographies, prises respectivement avec une plaque ordinaire, avec une plaque orthochromatique et avec une plaque panchromatique, d'un porte-bouquet rouge vif contenant des fleurs rouges (à gauche), des fleurs jaunes (en haut) et des fleurs violettes (à droite) ainsi que d'un vase bleu foncé et d'un album à couverture mouchetée rouge et vert. Observez attentivement sous le sujet les photographies du spectre solaire fournies par les diverses plaques : la plaque ordinaire est impressionnée par les lumières violette et bleue; la plaque orthochromatique est impressionnée par les lumières violette, bleue, verte et même par le jaune; la plaque panchromatique est impressionnée par les lumières violette, bleue, verte, jaune et même orange. Les fleurs jaunes et les fleurs rouges, sombres sur la plaque ordinaire, sont reproduites avec fidélité sur la plaque orthochromatique et sur la plaque panchromatique. De même, la couverture mouchetée vert et jaune de l'album est remarquablement reproduite sur la plaque panchromatique.

b) **Développement chromogène.** — Après une exposition très brève à la lumière, le cristal d'halogénure subit une modification, probablement un début de réduction à l'état d'argent métallique. Cette trace d'argent métallique catalyse la réduction en argent métallique du cristal entier par le révélateur RH (paraphénylènediamine, paraminophénol...) dans le bain de développement



réaction qui ne se produit qu'avec les cristaux préalablement impressionnés : l'image qui était latente apparaît en noir grâce au dépôt d'argent métallique.

En 1912, le chimiste allemand R. Fischer remarque que la trace d'argent Ag d'une image latente est capable de réaliser la synthèse d'une matière colorante RC si le révélateur RH est en présence d'un copulant C.



Il se produit donc simultanément une image noire et une image colorée. La couleur de cette dernière image dépend de la nature du révélateur et du copulant qui sont, l'un et l'autre, des matières complexes élaborées par les chimistes. L'image argentique noire est éliminée par un bain de blanchiment (eau de Javel) qui n'altère pas l'image colorée.

3. **MATÉRIEL TRICHOME.** — Un matériel trichrome est constitué d'un support (triacétate de cellulose pour le négatif, papier pour le positif) sur lequel on a coulé trois couches sensibles d'émulsion photographique (fig. 532). L'émulsion photographique est une suspension dans la gélatine de microcristaux de bromure d'argent additionné d'un sensibilisateur et d'un copulant.

a) **Négatif** (Planche II, A, B, C, D). — La couche supérieure ne renferme aucun sensibilisateur optique : elle n'est sensible qu'à la lumière bleue. La couche médiane et la couche inférieure contiennent des sensibilisateurs optiques qui absorbent respectivement les radiations vertes et les radiations rouges : la couche médiane est sensible à la lumière verte tandis que la couche inférieure est sensible à la lumière rouge. Le copulant C_1 de la couche supérieure donne une image jaune, complémentaire du bleu; le copulant C_2 de la couche médiane donne une image pourpre, complémentaire du vert; le copulant C_3 de la couche inférieure donne une image bleu-vert, complémentaire du rouge. Entre les couches C_1 et C_2 du négatif, un filtre jaune (couche de gélatine teintée) absorbe les radiations bleues qui, sans le filtre, impressionnent le sel d'argent des couches C_2 et C_3 : ce filtre jaune disparaîtra lors du développement.

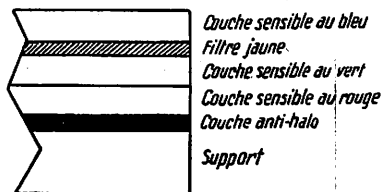


Fig. 532.

Lors du développement, il se forme dans chaque couche une image noire et une image colorée. L'image noire est éliminée par un procédé de blanchiment. Dès lors, l'image colorée subsiste. Le négatif est donc constitué d'images de couleurs complémentaires à celles de l'objet.

b) **Positif** (Planche III, D, E, F, G, H). — Pour tirer un positif sur papier, on dispose le négatif sur le papier et on soumet l'ensemble négatif-papier à la lumière blanche.

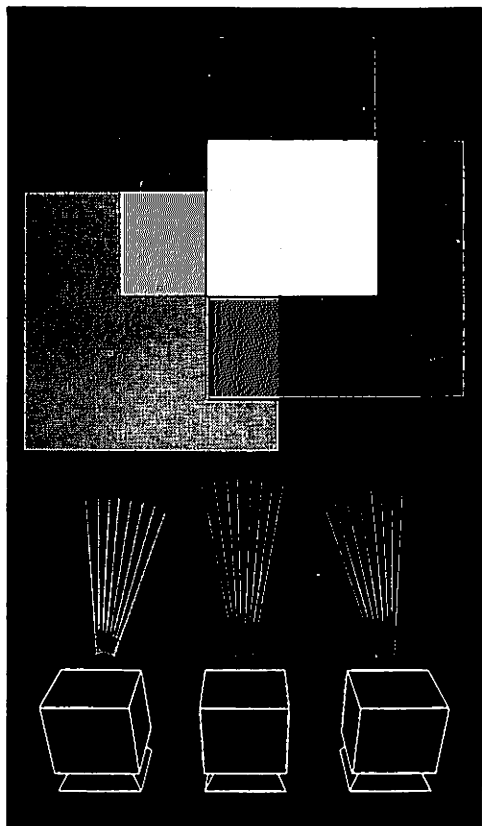
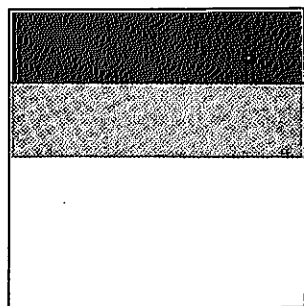
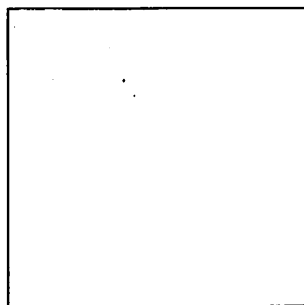
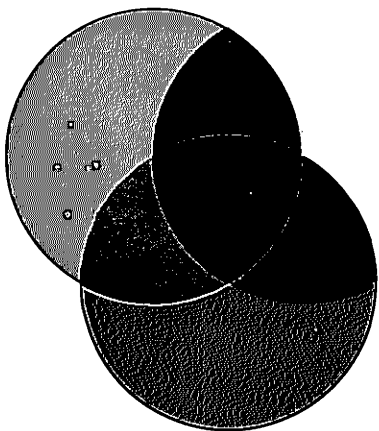
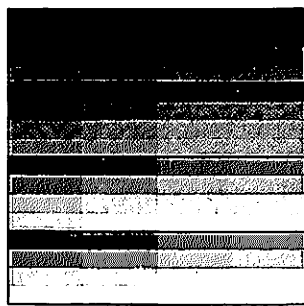
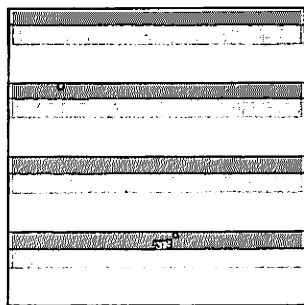
L'image jaune du négatif arrête les radiations bleues et laisse passer les radiations vertes et rouges : les couches médiane et inférieure du papier sont donc impressionnées et donnent, lors du développement chromogène, des images pourpre et bleu-vert dont la superposition rend le bleu de l'objet. L'image pourpre du négatif arrête les radiations vertes et laisse passer les radiations bleues et rouges : les couches supérieure et inférieure du papier sont donc impressionnées et donnent, lors du développement chromogène, des images jaune et bleu-vert dont la superposition rend le vert de l'objet. L'image bleu-vert du négatif arrête les radiations rouges et laisse passer les radiations bleues et vertes : les couches supérieure et médiane du papier sont donc impressionnées et donnent, lors du développement chromogène, des images jaune et pourpre dont la superposition rend le rouge de l'objet.

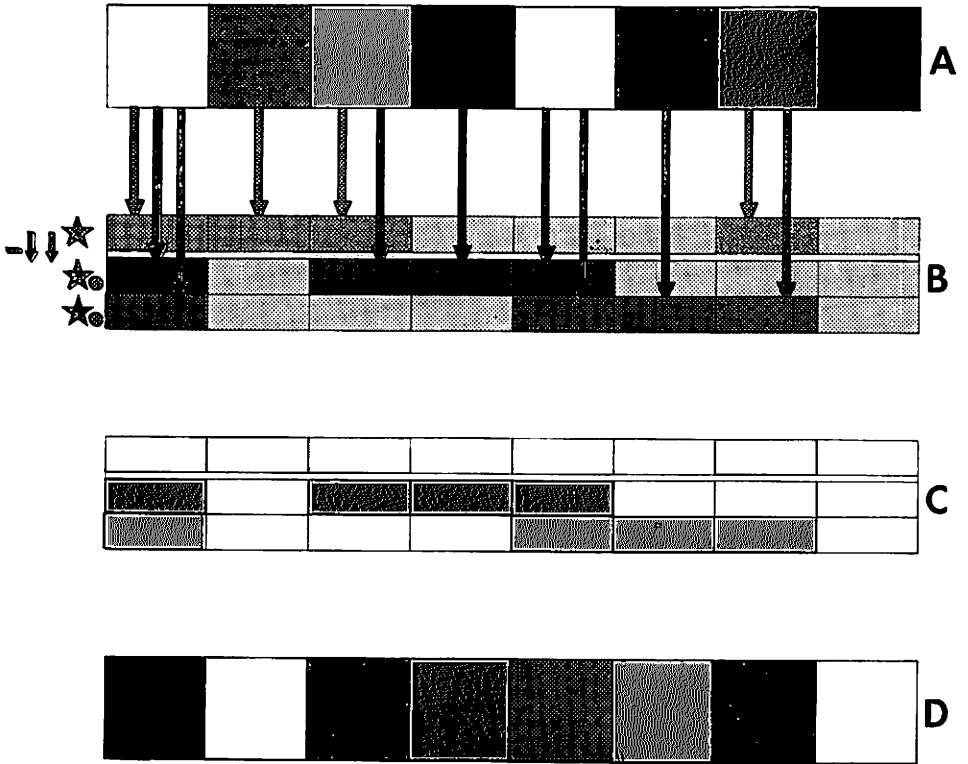
Le blanc d'un objet impressionne les trois couches du film et donne un négatif noir (jaune + pourpre + bleu-vert \rightarrow noir). Lors du tirage du positif, le négatif noir arrête toutes les radiations de sorte qu'aucune des trois couches du papier n'est impressionnée. Au développement chromogène, le papier rend le blanc de l'objet.

Par contre, le noir d'un objet n'impressionne aucune des trois couches du film et donne un négatif blanc. Lors du tirage du positif, le négatif blanc laisse passer les radiations bleues, vertes et rouges qui impressionnent les trois couches du papier. Au développement chromogène, la superposition du jaune, du pourpre et du bleu-vert rend le noir de l'objet.

Il est curieux d'observer qu'en photographie trichrome le noir résulte de la superposition des trois couleurs complémentaires tandis que le blanc résulte de la non-coloration des couches sensibles.


La planche IV montre les merveilleuses possibilités de la reproduction en couleurs : elle est la reproduction d'une scène familiale (le positif est en haut de la page; le négatif est en bas de la page).

A**B****C**



Formation d'images positives sur papier 'GEVACOLOR' d'après un sujet composé de parcelles colorées en

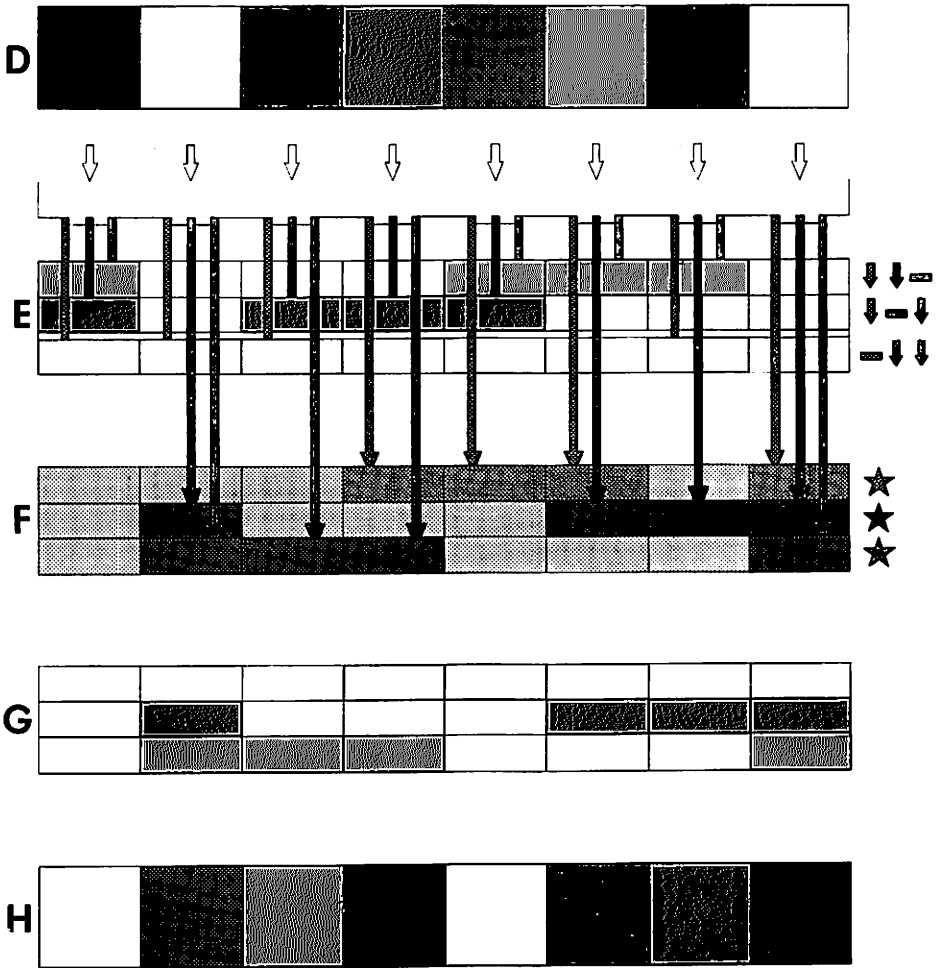
BLANC | BLEU | BLEU-VERT | VERT | JAUNE | ROUGE | MAGENTA | NOIR



 Les flèches longues indiquent la composition colorée et l'action des rayons lumineux provenant du sujet (ci-dessus), de la tireuse ou de l'agrandisseur (page de droite).

Les petites barres horizontales rappellent par leur couleur quels rayons sont arrêtés par le filtre jaune (ci-dessus) ou par les images des trois couches du négatif (page de droite). Les petites flèches colorées rappellent quels rayons peuvent passer à travers le filtre jaune ou à travers les trois images. Les petites flèches blanches (page de droite) symbolisent la lumière blanche de la tireuse ou de l'agrandisseur. Les étoiles et les points rappellent à quelles couleurs chaque couche est sensible.

En B, C, E, F et G sont schématisées les trois couches sensibles de la pellicule 'Gevacolor-Negative' et du papier 'Gevacolor'.



A : Sujet.

B : Pellicule négative après le développement chromogène.

C : Pellicule négative après le traitement complet.

D : Image négative.

E : Pellicule négative dans la tireuse ou l'agrandisseur.

Les rayons bleus, verts et rouges composant la lumière blanche sont sélectivement arrêtés par les trois images colorées. Les teintes intermédiaires non représentées résultent de la coloration partielle d'une ou de plusieurs couches, donc de l'arrêt de rayons colorés.

F : Image positive sur papier après le développement chromogène.

G : Image positive sur papier après le traitement complet.

H : Image positive sur papier en couleurs naturelles (vue par réflexion).



MATIÈRE ET RAYONNEMENT.

La matière et le rayonnement électromagnétique sont, en dernière analyse, les deux éléments constitutifs de l'Univers. Ils présentent tous deux une structure discontinue (atomes et photons), ils sont électriquement neutres (la matière par compensation, le rayonnement par nature) et ils constituent des supports d'énergie.

Des expériences récentes nous font assister à la dématérialisation de la matière avec apparition d'un rayonnement électromagnétique et réciproquement à la matérialisation des photons.

Le tableau suivant indique les fréquences élastiques et les fréquences électromagnétiques que nous avons rencontrées au cours de notre étude.

GAMME DES FRÉQUENCES

DÉNOMINATIONS	FRÉQUENCE EN CYCLES/S	LONGUEURS D'ONDE EN CENTIMÈTRES	OBSERVATIONS
---------------	-----------------------	---------------------------------	--------------

1°) Élastiques.

Les longueurs d'onde des phénomènes élastiques sont données pour la propagation dans l'air.

Rotation de la Terre sur elle-même	12.10 ⁻⁶		
Aiguille des secondes	17.10 ⁻³		
Respiration	25.10 ⁻²		
Pulsation du cœur	1		
Son le plus grave	16	2000	
Courant alternatif usuel	50		
La ₃ des musiciens	435	80	
Son le plus aigu	35.10 ³	1	
Ultra-sons	> 35.10 ³	< 1	

2°) Électromagnétiques.

Les longueurs d'onde des phénomènes électromagnétiques sont données pour la propagation dans le vide.

Ondes hertziennes grandes ondes	15.10 ⁴ à 3.10 ⁵	2.10 ⁵ à	10 ⁵	peuvent être dirigées (Radar)
ondes moyennes	3.10 ⁵ à 3.10 ⁶	10 ⁶ à	10 ⁴	
ondes courtes	3.10 ⁶ à 3.10 ⁸	10 ⁴ à	10 ²	
ondes ultra-courtes	3.10 ⁸ à 10 ¹²	10 ² à	3.10 ⁻²	
Infra-rouge	10 ¹² à 4.10 ¹⁴	3.10 ⁻² à	75.10 ⁻⁶	traversent le corps humain traversent quelques centimètres de plomb traversent quelques centimètres à quelques mètres de plomb
Lumière visible	4.10 ¹⁴ à 8.10 ¹⁴	75.10 ⁻⁸ à	37,5.10 ⁻⁶	
Ultra-violet	8.10 ¹⁴ à 3.10 ¹⁶	37,5.10 ⁻⁶ à	10 ⁻⁶	
Rayons X	1,5.10 ¹⁶ à 3.10 ¹⁸	2.10 ⁻⁶ à	10 ⁻⁹	
Rayons γ	2.10 ¹⁸ à 3.10 ²⁰	1,5.10 ⁻⁸ à	10 ⁻¹⁰	
Rayons cosmiques	10 ²³ à 10 ²⁴	10 ⁻¹² à	10 ⁻¹⁴	

APPENDICE AU TOME II.

PHYSIQUE TERRESTRE.

Les phénomènes qui ont leur siège sur notre globe et qui sont dus à des causes physiques font l'objet de la physique terrestre. Plus spécialement, les phénomènes physiques qui se passent dans l'atmosphère constituent la météorologie.

1. PHÉNOMÈNES THERMIQUES.

438. OBSERVATION DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR. — Pour observer la température de l'air, il est indispensable de soustraire le thermomètre à l'influence de certains agents tels que le rayonnement solaire, le rayonnement terrestre, la pluie, etc... A cet effet, les instruments sont placés dans un abri dans lequel l'air peut circuler librement. Cet abri est constitué d'une cage fermée de tous côtés par des persiennes.

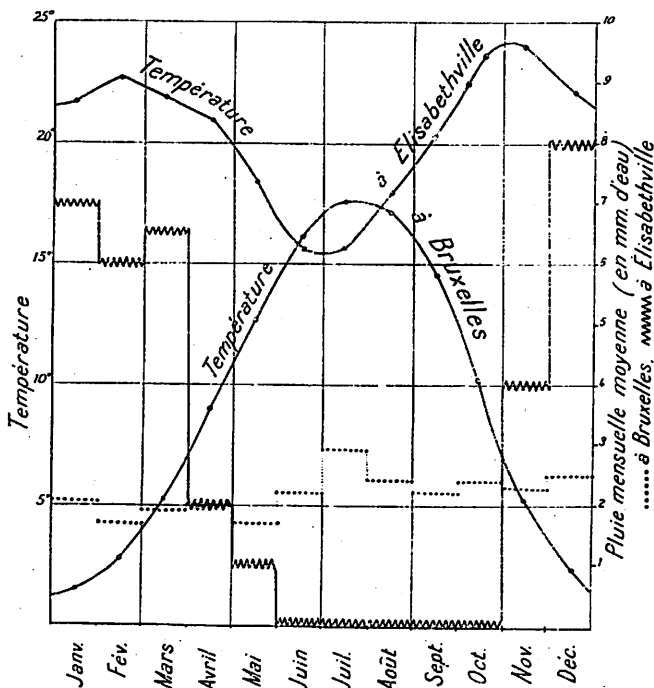


Fig. 533.

439. VARIATIONS THERMOMÉTRIQUES EN UN LIEU. — L'expérience montre que, dans nos régions, la courbe des températures enregistrées au cours d'une journée présente un maximum vers 14 heures et un minimum vers 4 heures. Souvent cependant, cette régularité disparaît pour

des causes locales : nuages, vents, etc... La moyenne arithmétique de nombreuses températures relevées au cours d'une journée constitue la température moyenne journalière; elle est sensiblement égale à la demi-somme des températures minimum et maximum relevées pendant la journée. La température moyenne mensuelle est la moyenne des températures moyennes journalières du mois. La fig. 533 indique les variations de la température moyenne mensuelle à Bruxelles et à Elisabethville. La température d'un lieu est la moyenne de plusieurs températures annuelles.

Les variations thermométriques journalières s'expliquent par le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même; les variations des températures mensuelles s'expliquent par le mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil.

440. VARIATIONS THERMOMÉTRIQUES A LA SURFACE DE LA TERRE. — La courbe obtenue en reliant entre eux les points de la Terre de même température est appelée **ligne isotherme**. L'observation d'une carte à isothermes montre que la température moyenne d'un lieu dépend de nombreux facteurs : 1°) la **latitude** qui change l'obliquité des rayons solaires et la durée de l'insolation; 2°) l'**altitude** qui provoque une diminution de 1° par 180 mètres d'élévation; 3°) la **direction des vents dominants**; 4°) le **voisinage d'un courant marin**; 5°) l'**écart entre les températures extrêmes**. En général, le voisinage de la mer diminue les écarts de température.

441. TEMPÉRATURE DE L'ATMOSPÈRE ET DU SOL. — Les ascensions stratosphériques ont montré que la température ne diminue pas indéfiniment avec l'altitude. A partir de 13 000 mètres, elle reste stationnaire aux environs de -60° .

Les variations de température d'un point dans le sol sont moins prononcées qu'en un point de la surface; elles finissent, à partir d'une certaine profondeur, par s'annuler à cause de la faible conductibilité des roches : à une profondeur déterminée, la température y est constante dans le temps. La température augmente en moyenne de 1° par 33 mètres de profondeur (degré géothermique). Dans les mines profondes, un aérage continu et énergique a pour effet d'y abaisser la température qui, sans aération, serait insupportable.

2. PHÉNOMÈNES BAROMÉTRIQUES.

442. VARIATIONS BAROMÉTRIQUES. — Dans nos régions, les variations de la pression atmosphérique n'ont aucun caractère de régularité. Elles sont liées à diverses causes telles que la température, la direction des vents, la pluie, etc... L'inégale répartition de la température à la surface du globe entraîne des variations locales de densité de l'air. L'air des régions chaudes, plus léger, monte vers les régions supérieures de l'atmosphère d'où il s'écoule vers les régions plus froides. L'air plus froid des régions environnantes afflue pour le remplacer. Ces mouvements atmosphériques ou **vents** ont donc pour origine des différences de température qui provoquent des variations barométriques. La connaissance des lignes isobares (Tome I, n° 171) permet de prévoir la direction des vents.

443. VENTS RÉGULIERS. — Dans les régions intertropicales soufflent des vents très réguliers : les **vents alizés** et les **vents contre-alizés**. Ces vents sont dus au fort échauffement de l'air au-dessus des régions équatoriales. Si la Terre était immobile, l'alizé, vent des basses régions de l'atmosphère, soufflerait des tropiques vers l'équateur dans la direction Nord-Sud;

le contre-alizé, vent des hautes régions de l'atmosphère, soufflerait en sens inverse de l'alizé correspondant. Par suite de la rotation de la Terre de l'Ouest vers l'Est, les courants sont déviés : les alizés soufflent du Nord-Est vers le Sud-Ouest dans l'hémisphère Nord et du Sud-Est vers le Nord-Ouest dans l'hémisphère Sud ; les contre-alizés soufflent en sens inverse.

Dans nos régions, comme vents réguliers, il n'y a guère que la brise de mer et la brise de terre. Pendant le jour, le sol s'échauffe plus que la mer ; il s'ensuit un léger déplacement d'air de la mer vers les côtes. Pendant la nuit, le sol se refroidit plus que la mer ; il s'ensuit un léger déplacement d'air de la terre vers la mer.

444. VENTS IRRÉGULIERS. — Les vents irréguliers sont des vents qui soufflent tantôt dans une direction, tantôt dans une autre. Les régions tempérées et les régions polaires connaissent surtout le régime des vents irréguliers. En certains endroits, se crée à la suite de certaines causes une forte dépression. Il en résulte un brusque appel de l'air des régions environnantes.

Considérons une carte météorologique telle qu'en publient journellement les observatoires (Tome I, fig. 252). Nous y observons des zones de basse pression ou zones cycloniques et des zones de haute pression ou zones anticycloniques. Nous constatons également que les vents suivent très fidèlement la direction des isobares : ils soufflent donc suivant des spirales. Dans l'hémisphère Nord, les vents soufflent dans le sens direct des aiguilles d'une montre dans les cyclones ; ils soufflent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre dans les anticyclones. Cyclones et anticyclones se déplacent et se déforment continuellement. Dans nos régions, les cyclones nous arrivent de l'Atlantique et nous amènent le mauvais temps (pluies) ; les anticyclones nous arrivent des vastes étendues de terre ferme de l'Europe et nous amènent le beau temps (grands froids en hiver, grandes chaleurs en été). Nous comprenons ainsi le rôle du baromètre dans la prévision du temps.

445. VITESSE DU VENT. — Lorsque la vitesse du vent est de 2 à 3 m/s, le vent est très léger ; de 14 à 20 m/s, le vent est très fort ; supérieure à 20 m/s, le vent souffle en tempête ; supérieure à 40 m/s, le vent souffle en ouragan. La vitesse du vent est mesurée au moyen de l'anémomètre : tourniquet horizontal dont la vitesse de rotation est indiquée par un compteur.

3. PHÉNOMÈNES HYGROMÉTRIQUES.

446. VARIATIONS HYGROMÉTRIQUES. — L'état hygrométrique de l'air est en relation avec la température de l'air, avec la présence de surfaces d'évaporation, avec la vitesse d'évaporation, etc... On conçoit donc qu'il varie suivant l'heure, le jour, la saison, le lieu (latitude, altitude et voisinage de la mer).

447. NUAGES ET BROUILLARDS. — Tant que la vapeur d'eau dans l'air est non saturée, elle est invisible. Mais si la vapeur d'eau y devient sursaturée à la suite d'un refroidissement, elle se liquéfie sous forme de gouttelettes excessivement ténues (1/50 mm de diamètre). Lorsque la condensation se produit dans la couche d'air en contact avec la terre, il y a formation de brouillard ou de brume (brouillard très épais). Les brouillards se forment fréquemment le matin et le soir au-dessus des lacs, des fleuves, des prairies, des forêts. Lorsque la condensation se produit dans l'atmosphère, il y a formation de nuage.

Les gouttelettes formant le brouillard ou le nuage devraient tomber. En réalité, la vitesse limite de chute des gouttelettes, étant données leurs dimen-

sions, est très faible (Tome I, n° 91). Un léger courant d'air ascendant suffit à empêcher leur chute.

448. PLUIE. NEIGE. GRÊLE. — La pluie provient soit de l'agglomération des gouttelettes d'eau d'un nuage, soit de la condensation brusque, sous forme de grosses gouttes, de la vapeur d'eau lorsqu'un courant d'air chaud rencontre un courant d'air froid.

Lorsque la condensation de la vapeur d'eau de l'air a lieu à une température inférieure à 0°C , il y a formation de neige (petits cristaux de glace enchevêtrés les uns dans les autres). Lorsque l'air est agité, la neige prend la forme de petits grains, spongieux à l'intérieur : il y a formation de grésil. La grêle est formée de masses compactes de glace affectant la forme de grains irréguliers. L'explication de leur formation n'est pas encore élucidée.

La moyenne annuelle d'eau tombée en une région, et la répartition des pluies dans le cours de l'année a une grande importance sur la fertilité du sol de la région. La figure 533 montre qu'en Belgique, les pluies sont assez abondantes toute l'année; que sous les tropiques, à une saison très pluvieuse succède une saison sèche.

449. ROSÉE. GELÉE BLANCHE. — Par les nuits claires qui suivent les journées chaudes, la surface de la terre rayonne énergiquement des radiations calorifiques vers les froids interplanétaires. Il en résulte un refroidissement du sol et des couches d'air voisines du sol. La vapeur d'eau, qui se trouve dans ces couches d'air, se condense et se dépose sur le sol : il y a formation de rosée. Une nuit claire (les nuages formant écran empêchent le rayonnement du sol) et une atmosphère calme (le vent renouvelle les couches d'air en contact avec le sol) sont les deux conditions nécessaires au dépôt de rosée.

Si la température du sol est inférieure à 0°C , l'eau se dépose sous forme d'une couche floconneuse de glace : il y a formation de gelée blanche.

4. PHÉNOMÈNES OPTIQUES.

450. BLEU DU CIEL. — Le ciel privé de nuage apparaît bleu, surtout au zénith. On a longtemps ignoré la raison de cette coloration du ciel. On ne peut admettre que la couleur du ciel est une couleur par transmission car les objets éloignés de nous devraient nous apparaître colorés en bleu. Cette couleur n'est due ni à l'ozone ni aux poussières atmosphériques puisque le ciel apparaît plus bleu observé des montagnes qu'observé des vallées. Il est prouvé que cette couleur est due à la diffusion de la lumière solaire par les particules d'air elles-mêmes, la diffusion du bleu étant plus intense que la diffusion de toute autre radiation.

451. RÉFRACTION ATMOSPHERIQUE. — Lorsqu'un faisceau de lumière issu d'un astre quelconque traverse l'atmosphère terrestre, il rencontre des couches successives d'air de plus en plus dense. L'indice de réfraction augmentant d'une façon continue, le faisceau lumineux suit un trajet légèrement curviligne. Il en résulte qu'un astre, qui n'est pas au zénith, nous apparaît plus haut sur l'horizon qu'il ne l'est en réalité (fig. 534). A cause de ce phénomène de réfraction atmosphérique, le Soleil, à son lever, nous apparaît

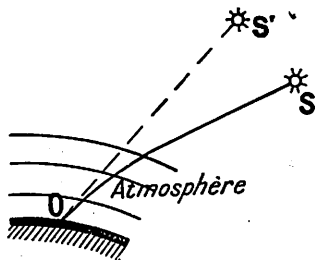


Fig. 534.

déjà tout entier alors que son bord supérieur atteint seulement l'horizon ; à son coucher, il nous apparaît encore tout entier alors que son bord supérieur atteint déjà l'horizon.

452. MIRAGE. — Le mirage donne des objets lointains des images renversées comme en donnerait une nappe d'eau tranquille (fig. 535). Nous nous bornerons à l'explication du mirage des déserts tropicaux. L'air calme, échauffé au contact du sol, se répartit en couches de plus en plus denses et, par conséquent, de plus en plus réfringentes à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère. Un rayon lumineux issu d'un objet lointain (un arbre) rencontre, en se dirigeant obliquement vers le sol, les différentes couches d'air et y subit la réfraction en s'écartant de la normale. Au fur et à mesure du passage du rayon lumineux dans les couches successives de moins en moins réfringentes, l'angle d'incidence augmente sans cesse et finit par dépasser la valeur limite : il y a alors réflexion totale. L'observateur placé au point O voit donc une image renversée de l'objet.

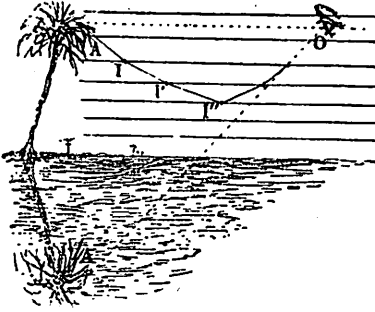


Fig. 535.

gentes, l'angle d'incidence augmente sans cesse et finit par dépasser la valeur limite : il y a alors réflexion totale. L'observateur placé au point O voit donc une image renversée de l'objet.

453. ARC-EN-CIEL. — Ce météore est formé d'un arc, parfois de deux arcs concentriques, présentant les couleurs du spectre solaire. Il apparaît le matin ou le soir après un orage ou une pluie locale momentanée. Considérons un faisceau de lumière solaire pénétrant dans une goutte d'eau (fig. 536). A l'entrée de la goutte, le faisceau se décompose et subit, pour des conditions déterminées, la réflexion totale en R. Il en résulte en E un faisceau émergent de la goutte. Ce faisceau élargi présente les diverses couleurs de la lumière solaire. Un observateur situé au point O reçoit donc une lumière diversement colorée. Ce phénomène s'observe très aisément lorsque, tournant le dos au soleil, nous regardons le matin les gouttes de rosée. Dans l'arc-en-ciel, ce sont les gouttelettes constitutives du nuage, éclairées obliquement par le Soleil, qui interviennent. L'explication complète de ce météore, explication due à Newton, dépasse le cadre de notre étude.

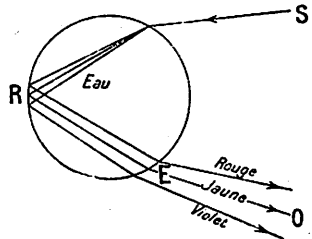


Fig. 536.

5. PHÉNOMÈNES MAGNÉTIQUES.

454. DÉCLINAISON. — Nous avons vu que la direction du champ magnétique terrestre est définie par la direction prise par une aiguille aimantée mobile dans tous les sens (n° 232). Les difficultés que présente la construction parfaite d'une aiguille aimantée libre de s'orienter dans tous les sens nous obligent à déterminer la direction du champ magnétique terrestre par un moyen détourné. Considérons une aiguille aimantée mobile dans un

plan horizontal (fig. 537). Chacune des forces F du couple terrestre qui agit sur l'aiguille peut être décomposée en deux forces : l'une verticale F_v et l'autre horizontale F_h . L'aiguille est donc soumise à deux couples de forces : l'un vertical $F_v F_v$ et l'autre horizontal $F_h F_h$. Le couple $F_v F_v$ n'a pas d'effet sur l'aiguille ; le couple $F_h F_h$ par contre, a pour effet de faire tourner l'aiguille autour de l'axe vertical et de l'orienter dans la direction des forces F_h . Le plan vertical passant par les pôles de l'aiguille en équilibre définit le méridien magnétique du lieu.

Le méridien magnétique et le méridien géographique d'un lieu ne sont pas confondus : ils forment entre eux un angle appelé **déclinaison magnétique**. Cette déclinaison est orientale ou occidentale selon que le pôle Nord de l'aiguille aimantée se place à l'est ou à l'ouest du méridien géographique.

Nous mesurons la déclinaison d'un lieu au moyen de la boussole de déclinaison. Cet appareil est constitué d'une aiguille aimantée mobile sur un pivot vertical fixé au centre d'un cercle gradué (fig. 538). Nous disposons la boussole horizontalement de manière que l'un des diamètres du cercle gradué coïncide avec le méridien géographique déterminé préalablement par des observations astronomiques et nous lisons l'angle que fait l'aiguille avec le méridien. Dans nos régions, la déclinaison est occidentale et vaut actuellement $5^{\circ}42'$.

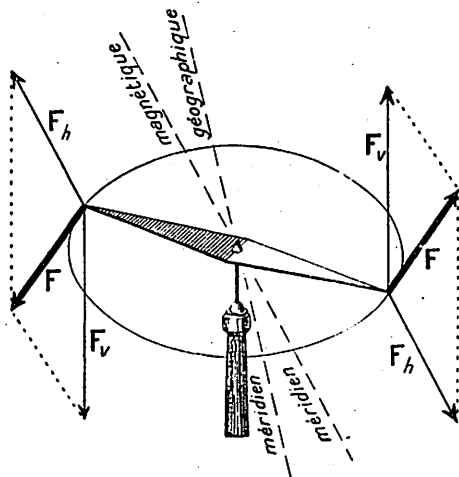


Fig. 537.

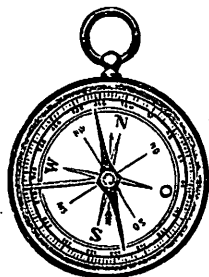


Fig. 538.

455. INCLINAISON. — La direction du champ magnétique terrestre et le plan horizontal forment un angle appelé **inclinaison magnétique**.

Nous mesurons l'inclinaison d'un lieu au moyen de la boussole d'inclinaison. Cet appareil consiste en un cercle vertical gradué au centre duquel un axe horizontal soutient l'aiguille aimantée. Nous disposons l'appareil de façon à amener le plan du cercle gradué à coïncider avec le plan du méridien magnétique. Les forces F du couple terrestre qui agit sur l'aiguille aimantée se trouvent dans le plan du cercle gradué : la direction prise par l'aiguille indique donc la direction du champ magnétique terrestre. La lecture de l'angle que fait l'aiguille avec l'horizontale nous donne l'inclinaison.

Dans nos régions, l'inclinaison vaut $65^{\circ}20'$ (le pôle Nord se dirigeant vers le sol).

456. INTENSITÉ DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE. — La connaissance de la déclinaison et de l'inclinaison permet de fixer la direction du champ magnétique terrestre. Pour définir complètement ce

dernier, il nous reste à en déterminer l'intensité. Nous mesurons, à cet effet, la période d'oscillation d'une aiguille d'aimantation connue (1).

A Bruxelles, l'intensité du champ magnétique terrestre vaut environ 0,467 Oe. Il en résulte pour la composante horizontale du champ magnétique terrestre une valeur de : $0,467 \cdot \cos 66^\circ = 0,19$ Oe. Cette composante horizontale peut être déterminée à l'aide de la boussole des tangentes (n° 280).

457. VARIATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE EN UN LIEU. — Les éléments du magnétisme terrestre subissent en un lieu des variations continues.

a) **Déclinaison.** La déclinaison présente de nombreuses variations : les unes régulières sont séculaires ou diurnes, les autres irrégulières sont connues sous le nom d'orages magnétiques.

Les variations séculaires de la déclinaison sont lentes : à Bruxelles, avant 1660, la déclinaison était orientale; en 1660, elle était devenue nulle. Depuis 1660, la déclinaison est occidentale; elle a augmenté jusqu'en 1825 où elle a atteint la valeur de 25° . Depuis 1825, elle diminue et redeviendra nulle vers 1990.

Les variations diurnes de la déclinaison n'atteignent qu'une amplitude de quelques minutes.

Les variations irrégulières de la déclinaison sont brusques et rapides : elles atteignent parfois une amplitude d'un degré. Les orages magnétiques sont en relation avec les orages, les aurores boréales, les éruptions volcaniques, les taches solaires, etc...

b) **Inclinaison.** L'inclinaison présente des variations qui ont une amplitude inférieure à celle des variations de la déclinaison.

458. VARIATIONS DU CHAMP MAGNÉTIQUE A LA SURFACE DU GLOBE. — A une époque déterminée, les éléments du magnétisme terrestre varient d'un lieu à un autre. On peut retrouver globalement les résultats généraux des observations en supposant que le champ magnétique terrestre est produit par un gros aimant hypothétique placé au centre de la terre et incliné quelque peu sur l'axe des pôles (fig. 539).

a) **Inclinaison.** Si, partant de nos régions, on s'avance vers le Nord, le pôle Nord de l'aiguille aimantée s'incline de plus en plus vers le sol et l'aiguille finit par prendre la direction verticale; l'inclinaison atteint alors 90° : on se trouve au **pôle magnétique Nord**. Si, partant de nos régions, on s'avance vers le Sud, le pôle Nord de l'aiguille aimantée s'incline de moins en moins vers le sol et l'aiguille finit par prendre la direction horizontale; l'inclinaison est alors nulle : on se trouve à l'**équateur magnétique**. L'équateur magnétique est incliné de 15° sur l'équateur géographique. Les mêmes phénomènes se produisent dans l'hémisphère Sud à l'exception toutefois que c'est le pôle Sud de l'aiguille qui se dirige vers le sol (fig. 539). Remarquons également que les pôles magnétiques terrestres ne sont pas aux extrémités

(1) C'est une méthode générale pour la mesure de l'intensité d'un champ magnétique. De même que la période d'oscillation du pendule dépend de l'intensité de la pesanteur, la période T d'oscillation d'un aimant est liée au champ magnétique H par la relation :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{MH}}$$

K : moment d'inertie du barreau donné par la relation $\frac{ML^2}{10}$ dans laquelle M désigne la masse du barreau en grammes et L sa longueur en centimètres.

M : moment magnétique de l'aimant défini par le produit de la masse magnétique m d'un des pôles de l'aimant par la distance L qui les sépare.

d'un même diamètre. Les lignes d'égale inclinaison ou **lignes isoclines** suivent avec beaucoup d'irrégularité les parallèles géographiques.

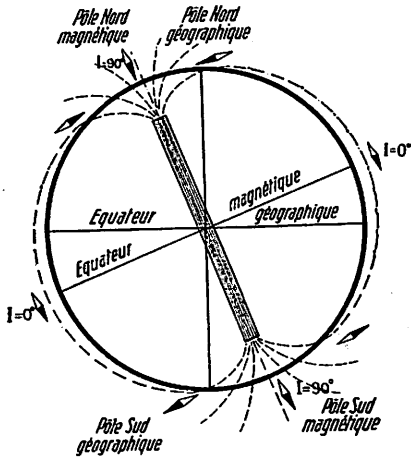


Fig. 539.

tiques de même qu'aux pôles géographiques, la déclinaison est indéterminée.

Les observatoires publient des cartes magnétiques qui nous indiquent les valeurs de l'inclinaison et de la déclinaison à la surface du globe.

c) **Intensité.** L'intensité du champ magnétique terrestre augmente du simple au double en passant de l'équateur au pôle.

b) **Déclinaison.** L'inclinaison de l'aimant central hypothétique sur l'axe des pôles de la Terre entraîne des déclinaisons variables avec la longitude du lieu (fig. 540). Si, partant de Bruxelles, on se dirige vers l'Ouest, la déclinaison augmente, passe par un maximum au milieu de l'Atlantique, diminue ensuite, s'annule en Amérique et devient orientale. Si, partant de Bruxelles, on se dirige vers l'Est, la déclinaison diminue, s'annule en U.R.S.S. et devient ensuite orientale.

Les lignes d'égale déclinaison ou **lignes isogones** rappellent très irrégulièrement les méridiens géographiques. Aux pôles magné-

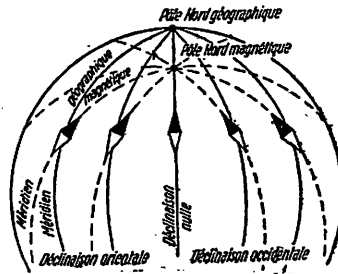


Fig. 540

459. **BOUSSOLES USUELLES.** — La connaissance de la déclinaison en un lieu permet d'employer l'aiguille aimantée pour l'orientation. L'instrument employé est la boussole de déclinaison (fig. 538). Une suspension appropriée (suspension à la Cardan) (fig. 541) permet à l'aiguille aimantée de rester mobile dans le plan horizontal malgré les oscillations du navire, de l'avion, etc...

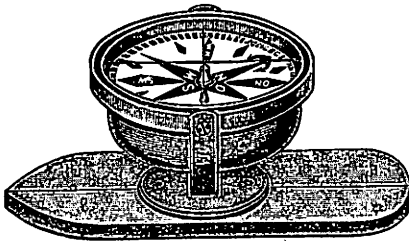


Fig. 541.

460. **ORIGINE DU MAGNÉTISME TERRESTRE.** — L'hypothèse de l'aimant central est évidemment à rejeter à cause de la haute température de la pyrosphère. Le magnétisme terrestre est dû, croit-on, pour sa plus grande partie à l'existence de minerais aimantés répartis dans l'écorce terrestre. Au champ créé par ces minerais aimantés se superposerait le champ produit par des courants électriques circulant perpendiculairement au méridien magnétique et faisant du globe un énorme solénoïde sphérique.

Quant à l'origine de ces courants, ils seraient engendrés par l'inégale répartition des températures à la surface du globe. D'autre part, la haute atmosphère (couche de Heaviside) est le siège de courants électriques importants qui produisent dans l'écorce terrestre des courants induits. Les variations et les perturbations du champ magnétique sont attribuées à ces courants.

6. PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES.

461. ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE. — Par une expérience restée célèbre, Franklin mit en évidence, en 1752, les propriétés électriques de l'atmosphère par temps d'orage. Il lança à cet effet, un cerf volant muni d'une pointe; il attacha la corde conductrice qui retenait le cerf volant à une clef isolée de la terre; il obtint, en approchant la main de la clef, des étincelles électriques qui auraient pu être mortelles.

Cependant, on ne tarda pas à s'apercevoir que la Terre se comporte comme un conducteur chargé d'électricité négative et que l'atmosphère, même par temps serein, est chargée d'électricité positive.

Ce n'est toutefois qu'à partir de 1900 que les observatoires entreprirent des recherches systématiques sur l'électricité terrestre.

462. CHAMP ÉLECTRIQUE TERRESTRE. — Il existe autour de la Terre un champ électrique. Pour déterminer le potentiel électrique en un point de ce champ, on utilise un électromètre sensible dont la cage est reliée au sol et dont l'aiguille est reliée à un collecteur (1) par un fil conducteur. Le collecteur, qui peut en principe être constitué d'une pointe, se met au potentiel du point où il se trouve. On observe qu'en général le potentiel d'un point de l'atmosphère croît avec l'altitude.

Les surfaces équipotentielles du champ électrique terrestre sont grossièrement parallèles à la surface de la Terre. La valeur du champ terrestre en un point déterminé est exprimée par le gradient de potentiel c'est-à-dire par la différence de potentiel existant entre ce point et un autre point distant verticalement d'un mètre. Dans nos régions, le champ électrique est dirigé vers la Terre et vaut, en moyenne, au voisinage du sol, 75 volts par mètre en été et 135 volts par mètre en hiver.

Le champ électrique subit, en un même lieu, des variations diurnes qui sont légères et des variations accidentelles qui sont parfois très importantes. Ces dernières variations sont dues à l'influence de nombreux facteurs : vents, poussières, brouillard, neige, taches solaires, orages. C'est ainsi qu'en temps d'orage le champ électrique peut atteindre, dans un sens ou dans l'autre, plusieurs centaines de kilovolts par mètre.

Le champ électrique diminue très rapidement avec l'altitude : à 4000 mètres, il est réduit au dixième de sa valeur au sol. Cette particularité permet de conclure à l'existence de charges positives dans l'atmosphère.

463. ORIGINE DU CHAMP ÉLECTRIQUE TERRESTRE. — IONISATION DE L'ATMOSPHÈRE. — L'expérience montre que l'air atmosphérique est le siège d'une ionisation continue attribuable à diverses causes : action des rayons ultra-violetts du Soleil, action de particules électrisées issues du Soleil (formation des aurores boréales), action de substances radio-actives terrestres et atmosphériques, effet photoélectrique sur les poussières, cristaux de glace des nuages, etc... Même enfermé dans un vase

(1) On emploie à l'heure actuelle des collecteurs à flamme (en produisant une flamme au voisinage de la pointe constituant le collecteur) ou à produits radioactifs. Ces collecteurs ionisent intensément l'air et prennent rapidement le potentiel du point expérimenté. On peut aussi faire agir le potentiel du collecteur sur la grille d'une triode dont on enregistre le courant de plaque; les variations rapides du potentiel sont, de la sorte, facilement et fidèlement enregistrées.

clos en plomb qui annihile toute cause ionisante ordinaire, l'air pur manifeste une ionisation faible mais continue. Cette ionisation est attribuée à une radiation extrêmement pénétrante. Des recherches récentes semblent indiquer que cette radiation appelée radiation cosmique provient des espaces interstellaires.

La production continue d'ions tend à augmenter la densité ionique (nombre d'ions par centimètre cube). Cependant, des ions de signes contraires se recombinent; des ions sont entraînés par le champ terrestre (courant de conduction), sont précipités par les pluies (courant de précipitation) ou sont entraînés par les vents (courant de convection). Il en résulte donc un état d'équilibre statistique dans la densité ionique.

464. IONISATION INTENSE DE LA HAUTE ATMOSPHERE. — On admet que la haute atmosphère est fortement ionisée et qu'elle est, par conséquent, très bonne conductrice de l'électricité. Cette zone très ionisée, connue sous le nom de couche d'Heaviside, serait le siège de courants électriques produisant les variations du champ magnétique terrestre. L'ionisation intense de la haute atmosphère commencerait le jour à 60 km d'altitude et serait due aux rayons ultra-violetts du Soleil; elle commencerait la nuit à 80 km d'altitude et serait due aux particules électrisées issues du Soleil. Cette variation d'altitude de la couche d'Heaviside, qui joue vis-à-vis des ondes hertziennes le rôle de couche réfléchissante par un phénomène de réflexion totale, semble expliquer la variation de portée des ondes hertziennes le jour et la nuit ainsi que le phénomène de « fading ».

465. ORAGES. — L'orage consiste en une série de décharges électriques produites par de gros nuages électrisés. Ces décharges électriques sont ordinairement accompagnées de fortes chutes de pluie ou de grêle.

1°) **Électrisation des nuages.** — On a remarqué que les ions constituent les centres de condensation lorsqu'on refroidit, par détente brusque, de l'air saturé d'humidité soumis à une ionisation intense. Les gouttelettes du brouillard portent donc des charges électriques.

Lorsque l'air dont l'état hygrométrique est assez élevé se refroidit pour l'une ou l'autre cause, la vapeur d'eau se condense sur les ions. Les gouttelettes formées se rassemblent pour produire des gouttelettes plus grosses de potentiel plus élevé. En effet, si huit gouttelettes de même rayon et de même charge se rassemblent, la goutte formée aura une charge octuple de celle des gouttelettes primitives mais elle aura un rayon (une capacité) double et, par conséquent, un potentiel quadruple de celui des gouttelettes primitives. Par un mécanisme encore mal connu, les charges électriques se séparent dans le nuage produit par la condensation de la vapeur d'eau et se portent aux parties inférieure et supérieure qui acquièrent une forte électrisation positive ou négative. Il en résulte un champ électrique très intense soit à l'intérieur même du nuage, soit (par suite du phénomène d'influence) entre le nuage et le sol ou entre le nuage et un nuage voisin.

2°) **Eclairs.** — Lorsque les champs électriques sont suffisamment intenses se produisent les décharges disruptives connues sous le nom d'éclairs. L'enregistrement photographique des éclairs a montré leur mécanisme de formation. Il naît d'abord dans le nuage un dard (éclair pilote) dirigé vers la terre. Ce dard est suivi d'une série de dards qui suivent le chemin tracé par le premier en se rapprochant sans cesse de la terre. Ce n'est qu'après que la liaison entre le nuage et le sol a été réalisée que se produit l'éclair principal.

Des mesures indirectes très ingénieuses ont permis d'évaluer l'intensité du courant de décharge à 25 000 ampères en moyenne et la durée du phénomène à 1/100 de seconde.

3^o) **Tonnerre.** — La forme ramifiée de la décharge disruptive d'une machine électrostatique se rapproche sensiblement de l'aspect des éclairs mais le bruit sec et net de cette décharge ne rappelle pas le roulement sourd et prolongé du tonnerre. Il faut attribuer ce roulement sourd et prolongé à des échos, à des résonances qui se produisent dans le nuage.

4^o) **Foudre.** — On appelle foudre la décharge électrique entre le nuage et le sol. La foudre a donc les effets d'une décharge puissante : effets calorifiques (fusion et volatilisation des conducteurs), effets mécaniques (rupture des isolants), effets magnétiques, (aimantation d'objets en acier), effets physiologiques.

466. PARATONNERRES. — Les paratonnerres sont des appareils de protection contre la foudre.

Paratonnerre de Franklin. — Le paratonnerre de Franklin est essentiellement constitué d'une tige métallique pointue qui est reliée au sol par l'intermédiaire d'une corde en cuivre rouge (fig. 542). Le contact du paratonnerre avec le sol doit être intime : à cet effet, le conducteur plonge dans l'eau d'un puits ou est relié à une grande plaque de cuivre enterrée à 5 mètres de profondeur et entourée de charbon de bois.

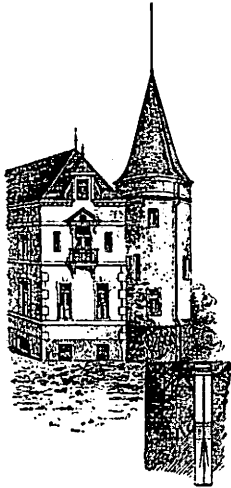


Fig. 542.

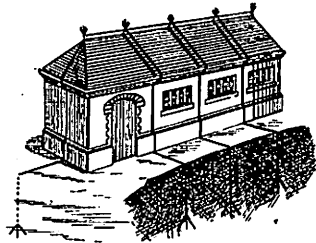


Fig. 543.

Paratonnerre de Melsen. — Le paratonnerre de Melsen est constitué d'une cage métallique qui entoure le bâtiment à protéger (fig. 543). Cette cage présente une série de faisceaux de pointes disposés le long de la tige qui suit le faite du bâtiment et est en communication intime avec le sol.

Les propriétés des pointes (n^o 101) et des écrans (n^o 122) expliquent aisément l'action des paratonnerres.

FORMULES PRINCIPALES.

OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.

Loi de la réflexion

$$i = i'$$

Distance focale des miroirs

$$f = R/2$$

Miroirs	}	relation de position	$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$
		relation de grandissement	$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{d'}{d}$

Loi de la réfraction

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n$$

Déviatiun d'un rayon dans un prisme

$$D = i + i' - A$$

Déviatiun d'un rayon dans un prisme de petit angle

$$D = (n - 1)A$$

Distance focale des lentilles

$$(n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right) = \frac{1}{f}$$

Lentilles	}	relation de position	$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}$
		relation de grandissement	$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{d'}{d}$

Diamètre apparent d'un objet

$$a = \frac{o}{d}$$

ÉLECTRICITÉ.

Loi de Coulomb (Electricité)

$$F = \pm \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{qq'}{d^2}$$

Champ électrique

$$H = \frac{F}{q}$$

Différence de potentiel

$$T = \frac{Q}{Q} (V - V')$$

Capacité électrique

$$C = \frac{Q}{V}$$

Energie d'un conducteur chargé	$T = \frac{1}{2} QV$
Capacité d'un condensateur	$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{4\pi d}$
Intensité d'un courant électrique	$I = \frac{Q}{t}$
Loi d'Ohm — 1 ^{re} forme	$I = \frac{U}{R}$
Loi de Pouillet	$R = \rho \frac{l}{s}$
Energie électrique	$T = U I t$
Puissance électrique	$W = U I$
Effet Joule	$Q = 0,24 I^2 R t$
Lois de Kirchhoff	$I = i_1 + i_2$
	$\frac{i_1}{r_1} = \frac{i_2}{r_2}$
	$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$
	$M = \frac{It}{96\,500} \cdot \frac{M_a}{n}$
Loi de Faraday	
Loi d'Ohm — 2 ^e forme	$I = \frac{E}{R_e + r_i}$
Groupement des générateurs en série	$I = \frac{nE}{R_e + nr_i}$
Groupement des générateurs en parallèle	$I = \frac{E}{R_e + \frac{r_i}{n}}$
Puissance d'un générateur	$W = EI$
Loi d'Ohm — 3 ^e forme	$I = \frac{E - E'}{R_e + r_i + r'_i}$
Puissance consommée dans un récepteur	$W'' = E'I$

Loi de Coulomb (Magnétisme)	$F = \pm \frac{1}{\mu} \cdot \frac{mm'}{d^2}$
Champ magnétique	$H = \frac{F}{m}$
Flux de force	$\mathcal{F} = H S \cos \alpha$
Loi de Laplace	$H = \frac{1}{10} \cdot \frac{Il}{d^2}$
Intensité du champ magnétique au centre d'un courant circulaire	$H = \frac{1}{10} \cdot \frac{2\pi I}{d}$
Intensité du champ magnétique à l'intérieur du solénoïde	$H = 1,25 nI$
Intensité de la force électromagnétique	$F = \frac{1}{10} HIl$
Induction magnétique	$\mathcal{B} = \mu H$
Force électromotrice d'induction	$E = 10^{-8} \cdot \frac{\Delta \mathcal{F}}{\Delta t}$
Force électromotrice d'une dynamo	$E = 10^{-8} Nn\mathcal{F}$

PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES.

Equation de vibration d'un oscillateur	$e_t = a \sin \frac{2\pi t}{T}$
Energie d'un oscillateur	$T = 2m\pi^2 a^2 \nu^2$
Longueur d'onde	$\lambda = VT$
	$\lambda = \frac{V}{\nu}$
Equation de vibration d'un point quelconque	$e_M = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$
Conditions d'interférence	Ventres $\Delta = 2k \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3...)$
	Nœuds $\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$
Distance entre un nœud et un ventre en ondes stationnaires	$l = \frac{\lambda}{4}$

Formule de Laplace	$v = \sqrt{\frac{E}{M}}$	
Vitesse de propagation dans les gaz	$v = \sqrt{\frac{kp_0}{M_0} (1 + \alpha T)}$	
Effets Döppler - Fizeau	$v' = v \left(\frac{v \pm v}{v} \right)$	
Fréquence de vibration des cordes	$v = \frac{k}{2l} \sqrt{\frac{F}{m}}$	
Tuyaux sonores	$\left\{ \begin{array}{l} \text{fermés} \\ \text{ouverts} \end{array} \right.$	$v = (2k + 1) \frac{v}{4l}$
		$v = 2k \frac{v}{4l}$
Force électromotrice induite	$E_t = E_m \sin \frac{2\pi t}{T}$	
Force électromotrice efficace	$E_e = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$	
Intensité efficace (circuits sans impédance)	$I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \text{ et } I_e = \frac{U_e}{R}$	
Puissance d'un courant alternatif (circuit sans impédance)	$W = U_e I_e$	
Puissance d'un courant alternatif (circuit avec impédance)	$W = U_e I_e \cos \varphi$	
Relation de résonance	$T = 2\pi \sqrt{LC}$	
Relation de transformation	$\frac{U_s}{U_p} = \frac{n_s}{n_p}$	
	$q = h\nu$	
Relation quantique	$E = \sigma T_a^4$	
Loi de Stéfán	$\lambda_m T_a = k$	
Loi de Wien	$\frac{e_1}{e_2} = \frac{d^2_2}{d^2_1}$	
Relation de photométrie		

TABLEAU DES UNITÉS

Le système C G S n'est guère utilisable dans la pratique : il adopte des unités de longueur, de masse, de force... trop petites et il aboutit en électricité à deux séries d'unités. Aussi tend-on à adopter un système d'unités proposé par l'Italien Giorgi, système dont les unités fondamentales sont :

le **mètre**, étalon du pavillon international de Sèvres;

le **kilogramme-masse**, étalon du pavillon international de Sèvres;

la **seconde**, temps défini par l'astronomie;

l'**ampère**, intensité de courant qui, traversant une solution de nitrate d'argent dépose par seconde 1,118 mg d'argent.

Il en dérive comme unités de

vitesse	le mètre par seconde (m/s)
accélération	le mètre par seconde par seconde (m/s^2)
force	le newton (N) ⁽¹⁾
travail	le joule (J)
puissance	le watt (W)

.....

champ électrique	le volt par mètre (V/m)
------------------	-------------------------

.....

champ magnétique	l'ampère-tour
flux magnétique	le weber (Wb) ⁽¹⁾

.....

Les principales unités C G S et Giorgi sont consignées dans les tableaux suivants :

(1) Force communiquant à une masse de 1 kg une accélération de $1m/s^2$. Le weber vaut 10^8 maxwells.

UNITÉS MÉCANIQUES

Grandeurs	Unités		Valeurs en C G S	Formules de liaison
	C G S	Giorgi		
longueur	cm	m	10^2 cm	
masse	g	kg	10^3 g	
temps	s	s		
vitesse	cm/s	m/s	10^2 cm/s	$v = e/t$
accélération	cm/s ²	m/s ²	10^2 cm/s ²	$a = v/t$
force	dyn	N	10^5 dyn	$F = Ma$
travail	erg	J	10^7 ergs	$T = Fe$
puissance	erg/s	W	10^7 ergs/s	$W = T/t$
pression	μ b	N/m ²	10^6 b	$p = F/S$
masse spécifique	g/cm ³	kg/m ³	10^{-3} g/cm ³	$M = M/V$
poids spécifique	dyn/cm ³	N/m ³	10^{-1} dyn/cm ³	$P = P/V$

UNITÉS ÉLECTRIQUES

Grandeurs	Unités C G S		Unités Giorgi	Valeurs en	
	u e s	u e m		u e s	u e m
Charge	1 u e s $\left(F = \frac{qq'}{d^2}\right)$	1 u e m $(Q = It)$	C $(Q = It)$	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
Potentiel	1 u e s $(V = T/Q)$	1 u e m $(V = T/Q)$	V $(V = W/I)$	1/300	10^8
Capacité	1 u e s $(C = Q/V)$	1 u e m $(C = Q/V)$	F $(C = It/V)$	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}
Intensité	1 u e s $(I = Q/t)$	1 u e m $(I = Hd^2/l)$	A	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
Résistance	1 u e s $(R = U/I)$	1 u e m $(R = U/I)$	Ω	$1/9 \cdot 10^{11}$	10^9

Table des valeurs naturelles des lignes trigonométriques.

Degrés	Sinus	Cosinus	Tangente	Cotang.	Degrés	Degrés	Sinus	Cosinus	Tangente	Cotang.	Degrés
0	0	1	0	∞	90	24	0,4067	0,9135	0,4452	2,2461	66
1	0,0175	0,9998	0,0175	57,2900	89	25	0,4226	0,9063	0,4663	2,1445	65
2	0,0349	0,9994	0,0349	28,6363	88	26	0,4384	0,8988	0,4877	2,0503	64
3	0,0523	0,9986	0,0524	19,0809	87	27	0,4540	0,8910	0,5095	1,9626	63
4	0,0698	0,9976	0,0699	14,3007	86	28	0,4695	0,8829	0,5317	1,8807	62
5	0,0872	0,9962	0,0875	11,4301	85	29	0,4848	0,8746	0,5543	1,8040	61
6	0,1045	0,9945	0,1051	9,5144	84	30	0,5000	0,8660	0,5773	1,7320	60
7	0,1219	0,9926	0,1228	8,1444	83	31	0,5150	0,8572	0,6009	1,6643	59
8	0,1392	0,9903	0,1405	7,1154	82	32	0,5299	0,8480	0,6249	1,6003	58
9	0,1564	0,9877	0,1584	6,3138	81	33	0,5446	0,8387	0,6494	1,5399	57
10	0,1736	0,9848	0,1763	5,6712	80	34	0,5592	0,8290	0,6745	1,4826	56
11	0,1908	0,9816	0,1944	5,1446	79	35	0,5736	0,8191	0,7002	1,4281	55
12	0,2079	0,9781	0,2126	4,7047	78	36	0,5878	0,8090	0,7265	1,3764	54
13	0,2250	0,9744	0,2309	4,3315	77	37	0,6018	0,7986	0,7535	1,3271	53
14	0,2419	0,9703	0,2493	4,0108	76	38	0,6157	0,7880	0,7813	1,2799	52
15	0,2588	0,9659	0,2679	3,7321	75	39	0,6293	0,7771	0,8098	1,2349	51
16	0,2756	0,9613	0,2867	3,4874	74	40	0,6428	0,7660	0,8391	1,1918	50
17	0,2924	0,9563	0,3057	3,2708	73	41	0,6561	0,7547	0,8693	1,1504	49
18	0,3090	0,9511	0,3249	3,0776	72	42	0,6691	0,7431	0,9004	1,1106	48
19	0,3256	0,9455	0,3443	2,9042	71	43	0,6820	0,7314	0,9325	1,0724	47
20	0,3420	0,9397	0,3640	2,7474	70	44	0,6947	0,7193	0,9657	1,0355	46
21	0,3584	0,9336	0,3839	2,6051	69	45	0,7071	0,7071	1,0000	1,0000	45
22	0,3746	0,9272	0,4040	2,4751	68						
23	0,3907	0,9205	0,4245	2,3558	67						
Degrés	Cosinus	Sinus	Cotang.	Tangente	Degrés	Degrés	Cosinus	Sinus	Cotang.	Tangente	Degrés

TABLE DES MATIÈRES

Livre V. — OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE.		Pages
Chapitre I. — Propagation de la lumière		5
Chapitre II. — Réflexion de la lumière		10
§ 1. Lois de la réflexion		10
§ 2. Miroirs plans		11
§ 3. Miroirs sphériques		16
Chapitre III. — Réfraction de la lumière		30
§ 1. Phénomènes généraux		30
§ 2. Milieux réfringents à faces planes		40
1. Réfraction à travers une face plane		40
2. Réfraction à travers une lame à faces parallèles .		41
3. Réfraction à travers un prisme		43
§ 3. Milieux réfringents à faces courbes		48
Chapitre IV. — Étude optique de l'œil		65
Chapitre V. — Instruments d'optique		71
Livre VI. — ÉLECTRICITÉ.		
Chapitre I. — Électrostatique		88
§ 1. Electrification par frottement		88
1. Phénomènes fondamentaux		88
2. Théorie électronique		92
§ 2. Distribution de l'électricité		94
§ 3. Champ électrique		97
§ 4. Potentiel		101
§ 5. Capacité		107
§ 6. Influence électrostatique		111
§ 7. Condensateurs		113
§ 8. Machines électrostatiques		121

	Pages
Chapitre II. — Électrodynamique	128
§ 1. Courant électrique	128
§ 2. Lois des courants	134
1. Loi d'Ohm	134
2. Loi de Pouillet	136
3. Loi de Joule	141
4. Lois de Kirchhoff	144
§ 3. Passage du courant dans les liquides	147
§ 4. Piles	154
1. Phénomènes fondamentaux	154
2. Piles hydro-électriques	156
3. Piles thermo-électriques	162
§ 5. Accumulateurs	163
§ 6. Généralisation de la loi d'Ohm	167
1. Circuit à générateur	167
2. Circuit à générateur et récepteur	174
§ 7. Passage du courant dans les gaz	177
§ 8. Phénomènes électroniques	186
1. Emission thermo-électronique	186
2. Emission photo-électronique	188
3. Radioactivité	189
§ 9. Constitution de la matière	189
Chapitre III. — Magnétisme	202
§ 1. Propriétés des aimants	202
§ 2. Champ magnétique	206
Chapitre IV. — Électromagnétisme	212
§ 1. Champ magnétique des courants	212
§ 2. Action d'un champ magnétique sur un courant	217
§ 3. Action d'un courant sur un courant	220

	Pages
§ 4. Aimantation par les courants	222
1. Lois	222
2. Applications	225
3. Théorie du magnétisme	228
§ 5. Induction électromagnétique	229
§ 6. Générateurs et moteurs à courant continu	237
1. Générateurs	237
2. Moteurs	241
3. Transmission de l'énergie	242
Chapitre V. — Électrométrie	250
§ 1. Mesure des intensités	250
1. Galvanomètres	250
2. Ampèremètres	253
§ 2. Mesure des tensions et des forces électromotrices	254
§ 3. Mesure des résistances	255

Livre VII. — PHÉNOMÈNES PÉRIODIQUES.

Chapitre I. — Généralités sur les mouvements périodiques	261
§ 1. Mouvements périodiques	261
1. Mouvement circulaire uniforme	261
2. Mouvement harmonique simple	266
3. Mouvement pendulaire	268
§ 2. Propagation du mouvement vibratoire	272
1. Vibrations transversales	272
2. Vibrations longitudinales.	276
§ 3. Composition des mouvements vibratoires	277
§ 4. Interférences	280
§ 5. Réflexion	283
§ 6. Diffraction	286
§ 7. Résonance	287

	Pages
Chapitre II. — Phénomènes périodiques en Acoustique.	299
§ 1. Production, propagation et perception des sons	299
§ 2. Qualités du son	303
1. Intensité	304
2. Hauteur	305
3. Timbre	309
§ 3. Instruments musicaux	311
1. Echelle musicale	311
2. Cordes vibrantes	314
3. Tiges vibrantes	316
4. Tuyaux sonores	317
5. Membranes vibrantes	320
Chapitre III. — Phénomènes périodiques en Electricité.	327
§ 1. Lois des courants alternatifs	327
§ 2. Production et utilisation des courants alternatifs	335
1. Alternateurs	335
2. Moteurs à courant alternatif	338
§ 3. Transformateurs	341
§ 4. Redressement des courants alternatifs	345
§ 5. Oscillations électriques	346
1. Expériences de Hertz	346
2. Lampe à trois électrodes	348
3. Téléphonie sans fil	351
4. Télévision	354
5. Radar	357
6. Sonorisation du cinéma	360
Chapitre IV. — Phénomènes périodiques en Optique.	367
§ 1. Théories de la lumière	367
§ 2. Vitesse de propagation de la lumière	368
§ 3. Dispersion de la lumière	371

	Pages
§ 4. Phénomènes d'interférence et de diffraction	374
1. Interférence	374
2. Diffraction	377
§ 5. Spectroscopie	380
§ 6. Polarisation	385
§ 7. Energie lumineuse	388
1. Production de lumière	388
2. Transformation de lumière	390
3. Photométrie	391
Matière et rayonnement	400
Appendice au Tome II : Physique terrestre	401
1. Phénomènes thermiques	401
2. Phénomènes barométriques	402
3. Phénomènes hygrométriques	403
4. Phénomènes optiques	404
5. Phénomènes magnétiques	405
6. Phénomènes électriques	409
Formules principales	412
Tableau des unités	416
Table des valeurs naturelles des lignes trigonométriques.	418

TABLE DES LECTURES

L'appareil photographique	82
La machine à millions de... volts.	124
L'éclairage électrique	197
Les pionniers de l'électricité	246
De l'infiniment grand à l'infiniment petit	257
Les satellites artificiels	289
Microsillon et magnétophone	324
Le problème de l'énergie	363
La photographie en couleurs	395

EXTRAIT DU CATALOGUE

Dessart (A.), docteur en Sciences, et Jodogne (J.), docteur en Sciences :

COURS DE PHYSIQUE, à l'usage de l'enseignement moyen, normal et technique.

Tome I : Mécanique et Pesanteur, Statique et Dynamique des Fluides, Chaleur (14^e édition).

Tome II : Optique géométrique, Électricité, Phénomènes périodiques, Éléments de Physique terrestre (14^e édition).

Ouvrage couronné par l'Académie Royale de Belgique
« PRIX DE KEYN »

COURS DE CHIMIE, à l'usage de l'enseignement moyen, normal et technique.

Tome I : Notions préliminaires, Métalloïdes, Métaux (9^e édition).

Tome II : Notions de Chimie Analytique (6^e édition).

Tome III : Notions de Chimie Organique (6^e édition).

ÉLÉMENTS DE SCIENCES NATURELLES, à l'usage du degré inférieur de l'enseignement moyen officiel :

Tome I : Zoologie-Botanique (5^e édition).

Tome II : Physique et Biologie (3^e édition).

Tome III : Chimie, Physique et Biologie (5^e édition).

NOTIONS DE SCIENCES NATURELLES, à l'usage du degré inférieur de l'enseignement libre :

Tome I : Notions de Zoologie (3^e édition).

Tome II : Notions d'Anatomie et de Physiologie humaines. Notions de Botanique. (3^e édition)

Tome III : Notions de Physique et de Chimie (4^e édition).

Dessart (A.), docteur en Sciences :

PROBLÈMES DE CHIMIE, à l'usage de l'enseignement moyen, normal, technique et supérieur (3^e édition).

PROBLÈMES DE PHYSIQUE, à l'usage de l'enseignement moyen, normal, technique et supérieur (3^e édition).

Jodogne (J.), docteur en Sciences :

MANIPULATIONS DE PHYSIQUE, à l'usage de l'enseignement moyen, normal et technique.