1110. **Courants induits de divers ordres.** — Malgré leur instantanéité, les courants induits peuvent eux-mêmes, par leur influence sur les circuits fermés voisins, donner naissance à de nouveaux courants induits, puis ceux-ci à d'autres, et ainsi de suite, de manière à produire des *courants induits de différents ordres*.

Ces courants, découverts par Henry (de New-Jersey), se constatent en faisant réagir les unes sur les autres, soit une suite de bobines cylindriques à deux fils (fig. 1015), de manière que le courant induit de la première se rende dans le fil inducteur de la seconde, et ainsi de suite, soit des bobines en spirale à un seul fil (fig. 1020), disposées de manière que le courant de la première induise la seconde, puis que le courant de celle-ci, se rendant à la troisième, induise la suivante, et ainsi successivement. Les courants qui se produisent alors sont alternativement de sens contraires, et leur intensité décroît à mesure qu'ils sont d'un ordre plus élevé.

1111. **Propriétés et comparaison des courants induits.** — Les courants induits possèdent toutes les propriétés des courants voltaïques. Comme ceux-ci, ils produisent des effets physiologiques, lumineux, calorifiques, chimiques, et donnent eux-mêmes naissance à de nouveaux courants induits. Enfin, il font dévier l'aiguille des galvanomètres et aimantent les barreaux d'acier quand on les fait passer dans un fil de cuivre enroulé autour de ces barreaux.

Toutefois le courant direct et le courant inverse ne sont pas identiques. Ils présentent, au point de vue de leurs effets, des différences qui sont résumées dans la loi suivante :

Les deux courants induits successifs, inverse et direct, sont égaux en quantité et inégaux en tension.

Cela veut dire que leurs effets *de quantité*, c'est-à-dire ceux qui dépendent de la quantité d'électricité qui circule dans un temps donné, sont identiques, tandis que leurs effets *de tension*, c'est-à-dire ceux qui dépendent de la tension, ou de la différence des potentiels aux deux extrémités du circuit induit, sont plus ou moins différents.

Les appareils mesureurs de la quantité sont le galvanomètre et le voltamètre. Or, toutes les fois qu'on met dans un circuit un galvanomètre qui reçoit successivement les deux courants d'une manière continue, il n'y a pas de déviation. Si on les fait passer dans un voltamètre, on trouve que si les électrodes ont une surface notable, il n'y a pas de décomposition, et que si les électrodes sont petites, il se dégage, sur chacune d'elles, de l'hydrogène et de l'oxygène, dans la proportion du mélange détonant.

Mais ces courants se montrent très différents dans les cas où il y des résistances à vaincre. Ainsi, en général, un courant n'est capable de donner une commotion qu'autant qu'il peut vaincre une résistance de 90 kilogrammes de fil de cuivre de 1 millimètre de diamètre. Or les courants induits inverses ne donnent pas de commotion, tandis que les courants directs en donnent de plus ou moins fortes.

De même, lorsqu'on fait passer autour d'une aiguille d'acier une série de courants induits, inverses et directs, on remarque que l'aimantation produite est due au courant direct et non au courant inverse.

Dans le cas de l'étincelle, c'est la même chose (bobine de Ruhmkorff) : les courants *directs* donnent des étincelles dans les mêmes circonstances où les courants *inverses* n'en produisent pas.

CHAPITRE XI

APPLICATIONS DE L'INDUCTION VOLTAÏQUE. BOBINE DE RUHMKORFF.

1112. **Bobine d'induction de Ruhmkorff.** — Ruhmkorff a construit pour la première fois, en 1851, des bobines à deux fils, de très grandes dimensions, qui sont de véritables *machines à courants induits* voltaïques. Elles engendrent des courants d'induction voltaïque dont les effets physiques, chimiques et physiologiques sont équivalents et même supérieurs à ceux des machines électriques et des batteries les plus puissantes.

1° *Description.* — Les dimensions de ces appareils sont variables; les plus grands que Ruhmkorff ait construits ont jusqu'à 65 centimètres de longueur et 24 centimètres de diamètre. Leurs organes essentiels sont : deux *circuits fermés* ou *bobines*, et un *interrupteur*.

Bobines. — Elles sont formées de deux circuits fermés : l'un en gros fil, de 2 à 2,5 millimètres de diamètre, et l'autre en fil fin, d'un quart ou d'un tiers de millimètre. Ces fils sont en cuivre rouge et recouverts de soie; de plus, chaque spire est isolée de la suivante par une couche de gomme laque fondue (fig. 1022).

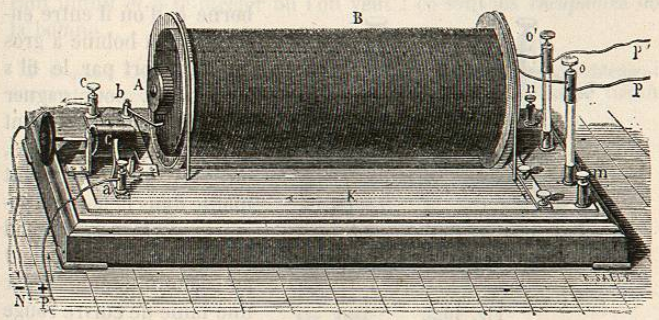

Fig. 1022.

C'est la bobine à gros fil qui constitue le circuit inducteur, par où passe le courant de la pile; sa longueur est de 40 à 50 mètres; c'est ce fil qu'on enroule le premier sur un cylindre creux de bois

ou de carton, qui forme le noyau de la bobine. Le tout est enveloppé d'un manchon de verre ou de caoutchouc isolant sur lequel on enroule le fil fin, qui est le fil induit. La longueur de ce fil varie avec les dimensions des bobines : dans les grandes, il peut avoir jusqu'à 120 000 mètres de long, et alors son diamètre est moindre que dans les petites bobines : $\frac{4}{5}$ de millimètre au lieu de $\frac{1}{5}$. En augmentant la longueur du fil fin, le courant induit gagne en tension; en augmentant le diamètre, le courant induit gagne en quantité.

Interrupteur à marteau. — Il y a plusieurs modèles d'*interrupteurs :* le plus simple est l'*interrupteur à marteau* (fig. 1023). Il se compose essentiellement d'une pièce de fer mobile *o*, le *marteau*, laquelle oscille entre un électro-aimant A qui l'attire d'une manière intermittente, et une pièce *h*, appelée *enclume*, où elle retombe par son propre poids. L'électro-aimant A est constitué par un faisceau de fils de fer doux, formant par leur ensemble un cylindre un peu plus long que la bobine, et c'est le courant inducteur qui l'aimante d'une manière intermittente.

2° *Fonctionnement de l'appareil.* — Pour faire marcher les petites bobines de 30 à 35 centimètres de longueur, il faut trois ou quatre éléments Bunsen grand modèle; pour les grandes bobines, Ruhmkorff estime qu'on doit prendre une surface de pile quatre fois plus grande que pour les petites.

Le courant de la pile, arrivant par le fil P à une borne *a* (fig. 1022), gagne de là le *commutateur* C (pièce accessoire, qui sera décrite ci-après), puis la borne *b*, d'où il entre enfin dans la bobine à gros fil. Il en sort par le fil *s* (fig. 1023), pour gagner l'interrupteur. En suivant la direction des flèches, on voit que le courant monte dans la borne *i*, gagne le *marteau o*, descend par l'*enclume h*, et revient au commutateur C par une lame de cuivre rouge K (fig. 1022). De là il se rend à la borne *c*, et enfin au pôle négatif de la pile par le fil N.

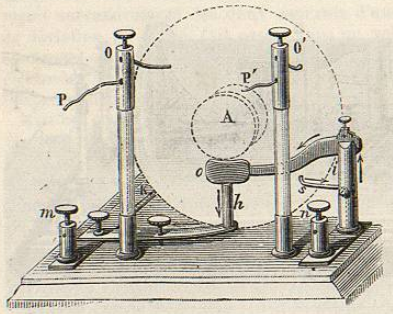

Fig. 1023.

Or on sait (1101) que le courant inducteur n'agit que lorsqu'il commence ou qu'il finit. Il faut donc que ce courant soit constamment interrompu. C'est au moyen du marteau oscillant *o* (fig. 1023)

qu'on réalise ces interruptions. En effet, le faisceau A s'aimantant dès que le courant de la pile passe dans le gros fil, le marteau *o* est attiré; mais aussitôt, le contact n'ayant plus lieu entre *o* et *h*, le courant se trouve interrompu, l'aimantation cesse et le marteau retombe; puis le courant passant de nouveau, la même série de phénomènes recommence, en sorte que le marteau se met à osciller avec une grande rapidité, ouvrant ainsi et fermant tour à tour le circuit : à chaque oscillation, deux courants d'induction, successivement direct et inverse, se produisent dans le fil fin.

Ces courants ont d'autant plus de tension que la bobine induite est plus résistante. On peut vérifier que les deux courants sont égaux en quantité, tandis que le courant direct a plus de tension que le courant inverse (1109). En effet, si l'on place un galvanomètre dans le circuit de la bobine induite, on ne remarque aucune déviation. Il n'en est plus de même si l'on écarte les deux extrémités P et P′ du fil induit (fig. 1022). La résistance de l'air s'opposant au passage des courants, c'est celui qui a le plus de tension, c'est-à-dire le courant direct, qui passe en excès, et plus l'intervalle de P à P′ augmente, plus le courant direct tend à passer seul, jusqu'à une limite où ni le courant inverse ni le courant direct ne passent. Dans ce dernier cas, il se produit alors en P et en P′ des tensions électrostatiques alternativement de sens contraires.

Rhéophores de la bobine. — Les fils qui sortent de la bobine en O et O′ (fig. 1023) sont les deux bouts du fil fin. Ils communiquent avec les deux fils plus gros P et P′ qui servent à recueillir le courant induit et à le diriger où l'on veut : ce sont les *rhéophores* de la bobine.

3° *Organes accessoires.* — I. *Condensateur.* — M. Fizeau a considérablement augmenté la tension des courants induits en interposant dans le circuit

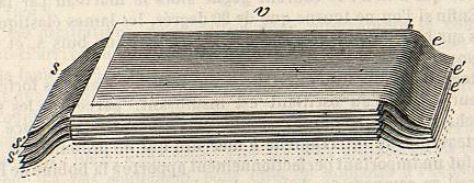

Fig. 1024.

inducteur un condensateur multiple. Il se compose de feuilles d'étain superposées et isolées les unes des autres par des feuilles de fort papier *v* (fig. 1024), plus larges que l'étain et trempées dans une dissolution de résine. De deux en deux, les feuilles d'étain débordent le papier : d'un côté en *e*, *e′ e″*... et de

l'autre en *s*, *s'* *s''*...; les étains de rang impair étant réunis par une pince forment une armature du condensateur, et ceux de rang pair forment l'autre armature. Dans les grandes bobines, la surface de chaque armature atteint ainsi 20 mètres carrés. L'une d'elles est en communication avec la borne *i*, qui reçoit le courant à sa sortie de la bobine, et l'autre est en communication avec la borne *m*, qui est reliée elle-même, par la lame K, avec le commutateur C, puis avec la pile. Le condensateur tout entier est renfermé dans le socle de bois qui supporte la bobine.

Pour comprendre l'effet du condensateur, il faut se rappeler qu'à chaque interruption du courant inducteur il se produit un extra-courant direct qui le continue en quelque sorte, prolonge sa durée et, par suite, affaiblit la tension du courant induit d'ouverture. Mais quand le condensateur est intercalé dans le circuit inducteur, cet extra-courant charge le condensateur d'électricité positive sur l'armature qui communique avec *i*, et d'électricité négative sur l'armature qui communique avec *m*. Or ces électricités contraires se recombinant aussitôt par le gros fil, la pile et le circuit CK*m*, qui relient les deux armatures, donnent naissance à un courant contraire à celui de la pile, lequel désaimante instantanément le faisceau de fer doux; le courant induit est donc d'une plus courte durée, et par suite plus intense. Les bornes *m* et *n* placées à l'extrémité de la planchette servent à recueillir l'extra-courant.

II. *Commutateur de Ruhmkhorff.* — L'appareil est muni d'un petit *commutateur à main* qui permet soit de changer à volonté le sens du courant inducteur dans la bobine inductrice, soit de l'interrompre brusquement.

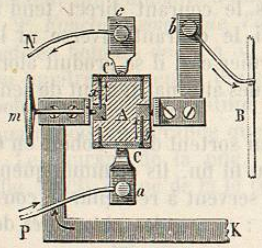

Fig. 1025.

Cet organe est représenté en coupe horizontale dans la figure 1025. Il est tout de cuivre, sauf le noyau central A, qui est un cylindre de buis; sur les deux côtés sont fixés deux contacts de cuivre C, C'. Sur ceux-ci s'appuient deux lames élastiques de laiton, liées aux deux bornes *a* et *c*, qui reçoivent les rhéophores de la pile. Le courant de celle-ci, arrivant en *a*, monte en C; de là, par une vis *y*, gagne la borne *b* et la bobine; puis, revenant par la lame K, qui communique avec le marteau, le courant va jusqu'en C' par la vis *x*, descend en *c* et retourne à la pile par le fil N. Si à l'aide du bouton *m* on tourne le commutateur de 180 degrés, il est facile de voir que c'est l'inverse qui a lieu : le courant gagne alors le marteau par la lame K et sort en *b*. Enfin si l'on ne tourne que de 90 degrés, les lames élastiques ne s'appuient plus sur les contacts C, C', mais sur le cylindre de buis A, et le courant est interrompu.

1113. **Interrupteur à mercure (de Foucault).** — Dans les fortes bobines, l'interrupteur à marteau oscillant est insuffisant, parce que les surfaces de contact s'échauffent alors jusqu'à se souder. Foucault a remplacé l'interrupteur à marteau par un interrupteur à mercure qui ne présente pas cet inconvénient. Ce fut un important perfectionnement apporté à la bobine de Ruhmkorff.

Cet appareil se compose de deux godets de verre *u* et *v* contenant du mercure dont la surface est recouverte d'une couche d'alcool (fig. 1026). Dans ces godets plongent deux tiges de platine *c* et *d*, fixées au même bras d'un levier AB dont l'autre bras porte une armature de fer doux A, sollicitée par un électro-aimant E. Le levier AB est porté par une tige *l*, montée elle-même sur une lame élastique d'acier, qui peut osciller librement à droite et à gauche, en transmettant son mouvement au levier et aux tiges *c* et *d*.

Enfin, la lame et le levier peuvent être soulevés plus ou moins à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon, et le tout est monté sur une planchette avec deux commutateurs à main et avec différents conducteurs.

A l'origine, les tiges de platine plongent dans le mercure, et l'on fait arriver par le fil *p*, au commutateur correspondant, le courant d'une *petite pile auxiliaire*, distincte de celle qui produit le courant inducteur. Le courant gagne le godet *u*, le levier BA, la lame d'acier, et de là le fil de l'électro-aimant, d'où il revient au même commutateur, puis à la pile par le fil *r*. L'armature A étant

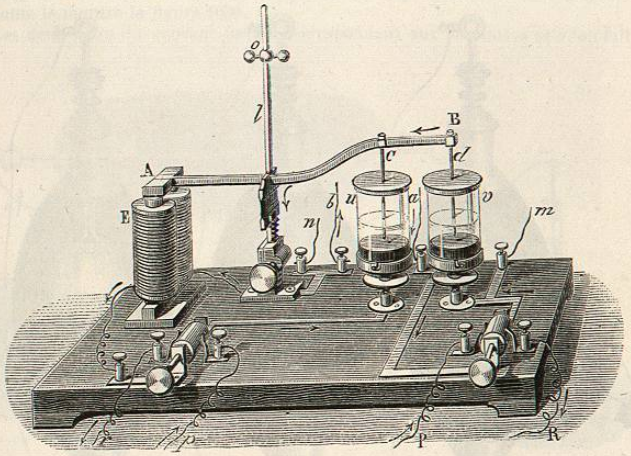

Fig. 1026.

alors attirée, la lame oscille vers A, les tiges *c* et *d* ne sont plus en contact avec le mercure et, le courant ne passant plus, l'électro-aimant devient inactif. La lame élastique oscillant aussitôt en sens contraire, les tiges de platine s'abaissent et le courant passe de nouveau. Les mêmes effets se reproduisent avec une rapidité de 50 à 60 oscillations par seconde : on retarde ou l'on accélère cette vitesse, en élevant ou en abaissant une masse *o* qui glisse le long de la tige *l*.

Ce sont ces oscillations qu'on utilise pour interrompre le courant inducteur. Celui-ci arrive en P au second commutateur, gagne le godet *v*, la tige *d*, le levier, la lame d'acier, et de là le fil *b*, qui le conduit au gros fil de la bobine. Or on voit que chaque oscillation du levier AB fait sortir la pointe *d* du mercure et produit une interruption dans le circuit inducteur.

Remarques. — 1° Les fils *m* et *n* sont en communication avec les bornes *m* et *n* de la bobine (fig. 1022), c'est-à-dire avec les deux armatures du condensateur.

2° L'alcool n'a pas seulement pour effet de s'opposer à l'échauffement par l'étincelle de rupture, il sert encore à empêcher l'oxydation aux points où elle éclate, en supprimant le contact avec l'oxygène de l'air.

1114. **Effets de la bobine de Ruhmkorff.** — Les effets de la bobine de Ruhmkorff sont comparables à ceux d'une batterie électrique extrêmement puissante. On peut les diviser en effets *physiologiques*, *calorifiques*, *chimiques*, *lumineux* et *mécaniques*.

Effets physiologiques. — Ils sont tellement intenses, que les commotions des bobines moyennes, quand le gros fil est parcouru par le courant d'un seul couple de Bunsen, sont déjà insupportables. Avec deux couples de Bunsen on tue un lapin, et avec un nombre de couples peu considérable un homme serait foudroyé.

Effets calorifiques. — Pour les constater, on interpose entre les extrémités P et P′ du fil induit (fig. 1022) un fil de fer très fin : celui-ci est fondu et brûle avec une vive lumière.

Effets lumineux. — Ces effets sont très variés, suivant qu'ils ont lieu à la

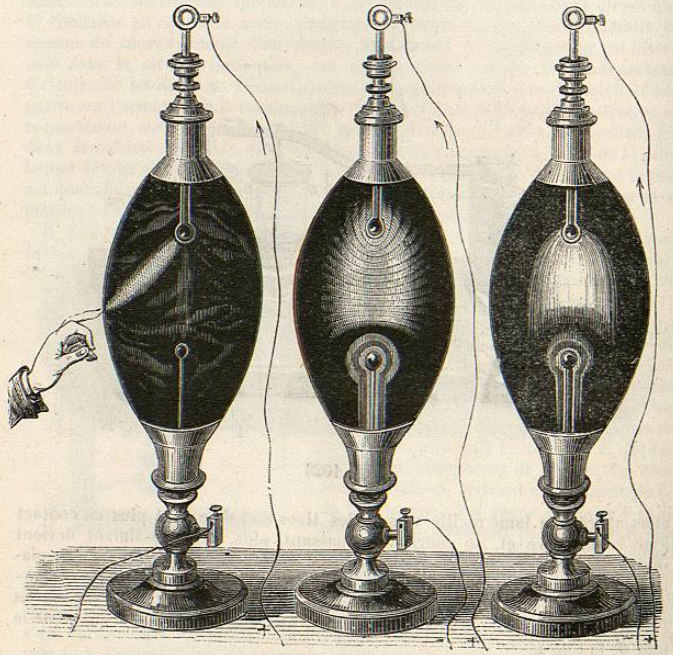

Fig. 1027. Fig. 1028. Fig. 1029.

pression ordinaire, ou dans des gaz très raréfiés, ou dans des vapeurs à très faible tension.

Dans l'air, il consistent en une série d'étincelles vives et bruyantes, dont la longueur va jusqu'à 45 centimètres avec la grande bobine de 65 centimètres de longueur. Dans l'air très raréfié, les effets sont fort remarquables. Pour faire l'expérience, on fait communiquer les deux fils P et P′ de la bobine avec les deux tiges de l'œuf électrique déjà décrit (977). Le vide étant fait dans le globe, à 1 ou 2 millimètres au moins, on voit une belle traînée lumineuse se produire d'une boule à l'autre, d'une manière sensiblement continue et avec la même intensité que celle qu'on obtient avec une puissante machine électrique dont on tourne rapidement le plateau (fig. 1029). La figure 1027 représente

la déviation par influence que subit la lumière électrique quand on approche la main de l'œuf.

C'est le pôle positif du courant induit qui présente le plus d'éclat; sa lumière est rouge de feu, tandis que celle du pôle négatif est faible et violacée; de plus, cette dernière se prolonge tout le long de la tige négative, phénomène qui ne se produit pas au pôle positif (fig. 1028).

Effets mécaniques. — La bobine de Ruhmkorff produit des effets mécaniques si puissants, qu'avec le grand appareil de 65 centimètres on perce une masse de verre de 5 centimètres d'épaisseur. L'expérience est alors disposée comme le montre la figure 1030.

Les deux pôles du courant induit correspondant aux boutons *a* et *b*, on fait

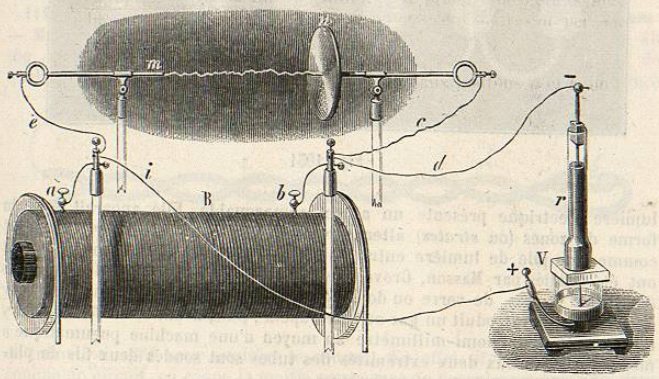

Fig. 1030.

communiquer par un fil de cuivre *i* le bouton *a* avec le conducteur inférieur d'un perce-verre (analogue à l'appareil décrit fig. 919), puis le pôle *b* par le fil *d* avec le conducteur supérieur. Celui-ci est isolé dans un gros tube de verre *r* rempli de gomme laque qu'on y a coulée à l'état de fusion. Entre les deux conducteurs est la plaque de verre à percer V. Dans le cas où celle-ci présenterait une trop grande résistance, il est à craindre que l'étincelle n'éclate dans la bobine même en trouant la couche isolante qui sépare les fils, et alors la bobine serait mise hors d'usage. Pour éviter cet accident, deux fils *c* et *c* mettent les pôles de la bobine en communication avec deux tiges métalliques horizontales, plus ou moins espacées l'une de l'autre. Alors, si l'étincelle ne peut trouer le verre, elle éclate de *m* en *n*, et la bobine est préservée.

Effets chimiques. — MM. Ed. Becquerel et Fremy ont constaté les effets chimiques de la bobine de Ruhmkorff en faisant éclater les étincelles entre les extrémités de deux fils de platine traversant les parois d'un tube de verre plein d'air et hermétiquement fermé. On trouve ainsi que l'azote et l'oxygène de l'air se combinent lentement, en donnant naissance à de l'acide nitreux; mais les effets chimiques de l'étincelle présentent l'inconvénient d'être compliqués d'effets calorifiques et d'effets mécaniques. Ces effets nuisibles disparaissent dans la décharge silencieuse, dite *effluve électrique.*

Charge des batteries. — La bobine de Ruhmkorff peut aussi être appliquée à charger des bouteilles de Leyde, et même des batteries de plusieurs jarres.

1115. **Effluve électrique**. — On nomme *effluve électrique* le passage silencieux et sans chaleur apparente de l'électricité à travers un milieu gazeux.

En passant à travers les gaz sous la forme d'effluve, l'électricité donne naissance à des réactions chimiques remarquables, qui dépendent beaucoup de la forme sous laquelle agit la décharge. M. Berthelot a fait une étude approfondie de ces effets et en a découvert les lois expérimentales.

1116. **Tubes de Geissler**. — Lorsqu'on fait passer la décharge de la bobine dans des tubes de verre contenant une vapeur ou un gaz très raréfiés, la

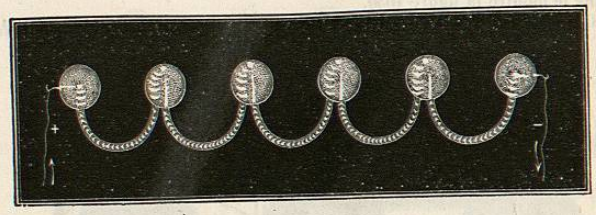

Fig. 1031.

lumière électrique présente un aspect remarquable. Elle apparaît sous la forme de zones (ou *strates*) alternativement brillantes et obscures, formant comme une pile de lumière entre les deux électrodes. Ces phénomènes, qui ont été étudiés par Masson, Grove, Gassiot, Plücker, etc., se produisent dans des tubes fermés, de verre ou de cristal, construits pour la première fois par Geissler. On y introduit un gaz ou une vapeur; puis, avant de les fermer, on y fait le vide à un demi-millimètre au moyen d'une machine pneumatique à mercure. Enfin, aux deux extrémités des tubes sont soudés deux fils de platine qui y pénètrent de 1 à 2 centimètres.

Aussitôt qu'on fait communiquer ces fils avec les pôles de la bobine de

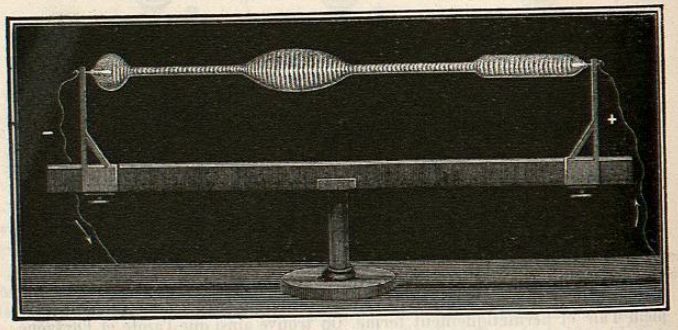

Fig. 1032.

Ruhmkorff, il se produit, dans toute la longueur des tubes, de magnifiques stries brillantes, séparées par des bandes obscures. Ces stries varient de forme, de couleur et d'éclat, avec le degré de vide, la nature du gaz ou de la vapeur, et les dimensions des tubes. Souvent le phénomène prend encore un

plus bel aspect par la fluorescence que la décharge électrique excite dans le verre.

La figure 1031 représente les stries données par l'hydrogène, à un demi-millimètre de pression, dans un tube alternativement renflé et étroit; dans les boules, la lumière est blanche; dans les parties capillaires, elle est rouge.

La figure 1032 montre les stries dans l'acide carbonique à un quart de millimètre de pression; la couleur est verdâtre, et les stries n'ont pas la même forme que dans l'hydrogène. Dans l'azote, la lumière est jaune-rouge.

Expériences de Plücker. — Plücker, qui a étudié la lumière des tubes de Geissler, a trouvé qu'elle ne dépend pas de la substance des électrodes, mais de la nature du gaz ou de la vapeur qui est dans le tube. Il a constaté aussi que les lumières fournies par l'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, etc., diffèrent beaucoup, quant au spectre qu'elles fournissent, lorsqu'on les fait passer au travers d'un prisme.

1117. **Application de la bobine de Ruhmkorff. — Fusée de Stateham** — M. Stateham, ingénieur anglais, a trouvé que, lorsqu'un fil de cuivre AB (fig. 1033) est recouvert de gutta-percha sulfurée, il se forme, au bout de quelques mois, au contact du métal et de son enveloppe, une couche de sulfure

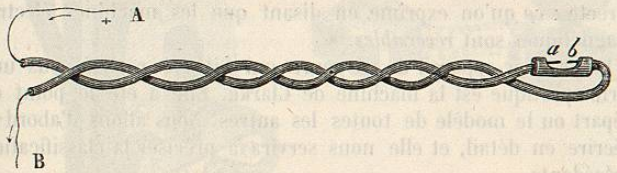

Fig. 1033.

de cuivre qui suffit pour conduire le courant. En effet, si, en une partie quelconque du circuit, on coupe la moitié supérieure de l'enveloppe, puis que, dans l'échancrure *ab* ainsi formée, on enlève un morceau du fil de cuivre de 6 millimètres de longueur, un courant intense qui passe dans le fil est interrompu de *a* en *b*, mais passe par le sulfure qui adhère à la gutta et le fait entrer en ignition. D'où il résulte que si, dans la cavité ainsi creusée, on met un corps inflammable, comme du coton-poudre ou de la poudre à canon, ce corps prend feu : de là le nom de *fusée de Stateham* donné à cet appareil.

Pour faire partir la fusée avec un courant voltaïque, il faudrait une pile très puissante. Mais si l'on fait usage de la bobine de Ruhmkorff, on obtient les mêmes effets avec deux couples de Bunsen. La décharge de la bobine entre les points *a* et *b* suffit pour enflammer la fusée.

CHAPITRE XII

APPLICATIONS DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME ET DE L'INDUCTION.

MACHINES ET MOTEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

1118. **Définitions**. — On comprend sous le nom général de *machines électromagnétiques* des appareils qui transforment le travail