Si nous supposons que toutes ces surfaces sont indéfinies, la densité y est évidemment constante et l'appareil est un *condensateur absolu*. Déterminons la densité sur une portion A de la surface de l'armature interne. On pourrait la calculer directement en fonction du potentiel de l'armature interne; mais on peut la déduire de formules connues en considérant les deux surfaces planes comme appartenant à un condensateur cylindrique dont les rayons seraient infiniment grands, ou dont la distance des armatures serait très petite par rapport aux rayons. En faisant cette hypothèse dans les formules d'un *condensateur cylindrique absolu*, on a pour la densité sur la face AB

$$\delta = \frac{V}{4\pi d};$$

pour la densité sur la face CD

$$\delta' = \frac{V}{4\pi d'},$$

et pour la charge totale Q, correspondant à une superficie A de l'armature,

$$Q = A(\delta + \delta') = \frac{VA}{4\pi}\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'}\right).$$

Si les deux plaques qui servent d'armature extérieure sont à la même distance d des faces de l'armature intérieure, la formule devient

$$Q = \frac{VA}{2\pi d}.$$

S'il n'y a qu'une seule plaque d'armature extérieure, il faut faire $d' = \infty$ dans la formule générale, et l'on a

$$Q = \frac{VA}{4\pi d}.$$

Les formules correspondantes de la capacité sont

$$C = \frac{A}{4\pi}\left(\frac{1}{d} + \frac{1}{d'}\right), \quad C = \frac{A}{2\pi d}, \quad C = \frac{A}{4\pi d}.$$

Dans la pratique les surfaces ne sont pas indéfinies : elles sont forcément limitées et la densité électrique augmente sur les bords ; mais l'approximation des formules est suffisante lorsque d est très petit par rapport à A.

973. **Condensateurs ordinaires.** — 1° *Bouteille de Leyde.* — La quantité d'électricité ne peut pas être la même sur les deux armatures, puisque l'armature interne n'est pas *complètement enveloppée* par l'armature externe. L'enveloppe est complétée par l'espace environnant. Il en résulte qu'une petite quantité d'électricité paraît libre pour l'observateur qui se trouve placé entre le bouton et les corps avoisinants. C'est cette électricité libre qui fait diverger le pendule du collecteur dans le condensateur d'Æpinus.

A la capacité due aux deux armatures cylindriques il faudrait donc ajouter celle du bouton extérieur ; mais sa valeur est ordinairement négligeable. En appliquant les formules du condensateur cylindrique absolu à une bouteille de Leyde dont l'armature interne aurait une surface A, on a

$$C = \frac{A}{4\pi d}.$$

2° *Batteries électriques.* — La capacité d'une batterie est évidemment égale à la somme des capacités des jarres. On a donc

$$C = \frac{A}{4\pi d} + \frac{A'}{4\pi d'} = \frac{A''}{4\pi d''} + \ldots = \Sigma \frac{A}{4\pi d},$$

en appelant A, A' A'',... les surfaces des armatures internes et d, d', d''... les distances à l'armature externe. Ordinairement les jarres sont formées du même verre, de même épaisseur et de même surface. On a donc

$$A = A' = A'' = \ldots, \quad \text{et} \quad C = \frac{nA}{4\pi d},$$

n étant le nombre des jarres.

3° *Condensateurs plans multiples.* — Ils sont formés de feuilles de zinc superposées et séparées par des lames isolantes en parchemin ou en papier enduit de paraffine. On a ainsi un condensateur qui a une grande capacité sur une petite étendue.

Ce condensateur peut être considéré comme une batterie électrique dont chaque élément serait un condensateur plan analogue à ceux qui ont été étudiés ci-dessus.

Pour chaque élément on a

$$C = \frac{A}{2\pi d}.$$

Pour l'ensemble, on a

$$C = \frac{An}{2\pi d}.$$

974. **Pouvoir inducteur spécifique. — Expériences de Faraday.** — Faraday a trouvé que la capacité électrique d'un condensateur ne dépend pas seulement de la distance des armatures, mais qu'elle varie aussi avec la nature du corps isolant interposé. C'est cet isolant qu'il appelait le *diélectrique*.

Il a défini *pouvoir inducteur spécifique* d'un diélectrique le rapport qui existe entre la capacité d'un condensateur dont les armatures seraient séparées par une lame de cette substance et la capacité qu'il aurait si l'on remplaçait cette dernière par une couche d'air de même épaisseur.

Dans les calculs précédents relatifs à la capacité des condensateurs absolus, nous avons supposé les armatures séparées par une couche d'air, et par conséquent le *pouvoir spécifique inducteur* égal à 1. Pour avoir le *pouvoir condensant réel*, il faut multiplier le *pouvoir condensant apparent* par le nombre qui représente le *pouvoir inducteur spécifique* de la substance interposée.

En effet, en appelant P le pouvoir *condensant réel*, C_1 la capacité de l'armature interne isolée, C la capacité de l'armature interne faisant partie du condensateur à lame d'air, et C' la capacité de l'armature interne faisant partie du condensateur à lame diélectrique, on a, par définition,

$$P = \frac{C'}{C_1} = \frac{C}{C_1} \times \frac{C'}{C}.$$

Or $\frac{C}{C_1}$ est le pouvoir condensant *apparent* (sans tenir compte du diélectrique), et $\frac{C'}{C}$ est précisément le pouvoir inducteur spécifique, tel qu'il a été défini plus haut.

En représentant par 1 le pouvoir inducteur de l'air, les pouvoirs inducteurs spécifiques des substances suivantes sont :

Air	1,00	Cire jaune	1,86
Flint	1,76	Verre	1,80
Résine	1,77	Gomme laque	2,00
Poix	1,60	Soufre	2,21
Caoutchouc	2,80	Gutta-percha ordinaire	3,80

Quant aux gaz, Faraday a trouvé qu'ils ont tous sensiblement le même pouvoir inducteur, et que ce pouvoir n'est modifié ni par la température ni par la pression du gaz.

EFFETS DES CONDENSATEURS. — EXPÉRIENCES CLASSIQUES.

975. **Effets divers de l'électricité statique.** — C'est avec les condensateurs, surtout les bouteilles de Leyde et les batteries, qu'on manifeste le mieux les effets de l'électricité statique. Ces effets sont très variés; on peut les diviser, suivant la nature des phénomènes qu'ils produisent, en *effets physiologiques*, *lumineux*, *calorifiques*, *mécaniques* et *chimiques*.

976. **Effets physiologiques.** — Les *effets physiologiques* sont ceux que l'électricité produit sur les êtres vivants ou même sur les animaux récemment tués. Ils consistent, chez les premiers, en une excitation violente de la sensibilité et de la contractilité des tissus organiques que la décharge traverse, et chez les derniers en contractions musculaires brusques qui simulent le retour à la vie. Il ne sera question, pour le moment, que des actions physiologiques exercées par l'électricité statique à forte tension; plus tard, nous décrirons les effets physiologiques de l'électricité à l'état dynamique.

Nous avons déjà parlé de la commotion que donne l'étincelle de la machine électrique. Cette commotion acquiert une bien plus grande intensité et un caractère particulier quand c'est de la bouteille de Leyde qu'on tire l'étincelle, en touchant d'une main son armature extérieure et de l'autre son armature intérieure. Avec une petite bouteille, la commotion se fait sentir jusque dans le coude; avec une bouteille d'un litre, on la ressent jusque dans l'épaule, et jusque dans la poitrine avec des bouteilles plus grandes.

La bouteille de Leyde peut donner simultanément la commotion électrique à un très grand nombre de personnes. Pour cela celles-ci doivent *former la chaîne*, c'est-à-dire se donner la main d'une manière continue; puis, la première touchant l'armature extérieure d'une bouteille chargée, et la dernière touchant en même temps le bouton de l'armature intérieure, toutes reçoivent simultanément la commotion, qu'on gradue à volonté en chargeant plus ou moins la bouteille. L'abbé Nollet donna ainsi la commotion à 300 hommes, qui la ressentirent en même temps, d'une manière violente, dans les bras et la poitrine. Dans cette expérience, à cause de la déperdition dans le sol, les hommes qui sont au milieu de la chaîne éprouvent une commotion moins vive que ceux qui sont rapprochés de la bouteille.

Avec les grandes bouteilles de Leyde et les batteries, la commotion ne peut plus être subie impunément. Priestley a tué des rats avec des batteries dont chaque armature avait une surface totale de 65 décimètres carrés, et des chats avec des armatures dont la surface était de 3 mètres carrés et demi.

977. **Effets lumineux.** — **Œuf électrique.** — La recomposition des deux électricités à forte tension s'opère toujours avec un dégagement de lumière plus ou moins intense : c'est ce qui arrive quand on tire des étincelles de la machine

électrique, de la bouteille de Leyde et des batteries. L'éclat de la lumière est d'autant plus vif que les corps entre lesquels a lieu l'explosion sont meilleurs conducteurs, et sa couleur varie non seulement avec la nature de ces corps, mais avec l'atmosphère ambiante et la pression.

On étudie les effets de la pression plus ou moins forte de l'air sur l'éclat de la lumière électrique au moyen de l'*œuf électrique*. On nomme ainsi un globe de verre porté sur un pied de cuivre, dans lequel sont deux tiges de laiton terminées en boule (fig. 912). La tige inférieure glisse à frottement dans une boîte à cuir, de manière à pouvoir être rapprochée ou écartée à volonté. Le vide étant fait dans le globe, à 1 ou 2 millimètres, au moyen de la machine pneumatique, sur laquelle il peut se visser, on fait communiquer la

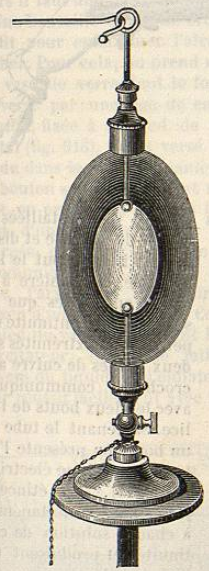

Fig. 912.

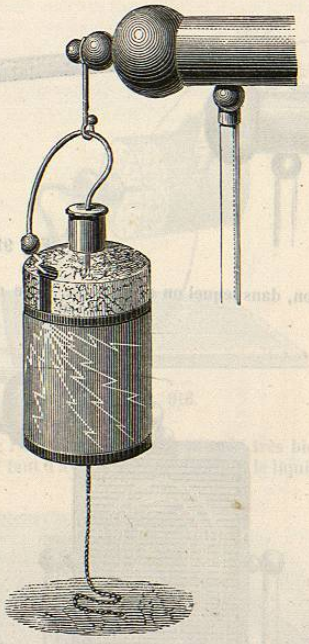

Fig. 913.

tige supérieure avec une forte machine électrique, et le pied avec le sol. Si l'on charge alors la machine, on observe, d'une boule à l'autre, une lumière purpurine peu intense et continue, due à la recomposition des électricités contraires. L'éclat augmente vers les extrémités, surtout vers la boule positive, et la boule négative ainsi que la tige qui la porte sont entourées d'une lumière violacée.

Si on laisse rentrer l'air peu à peu, la tension augmente avec la résistance, et la lumière, qui redevient blanche et brillante, n'apparaît plus que sous la forme d'étincelle. Cette expérience doit être faite dans l'obscurité.

978. **Bouteille, tube et carreau étincelants.** — On a imaginé de nom-

breux appareils pour montrer les effets lumineux de l'électricité ; tels sont la *bouteille étincelante*, le *tube étincelant*, le *carreau magique*.

La *bouteille étincelante* est une bouteille de Leyde dont l'armature extérieure est formée d'une couche de vernis sur laquelle on a répandu de la limaille de cuivre. Une bande d'étain, collée au bord inférieur de la bouteille, est en communication avec le sol au moyen d'une chaîne de métal (fig. 913) ; une seconde bande placée plus haut porte un appendice arrivant à 2 centimètres environ du crochet, qui est très recourbé. Cette bouteille étant suspendue à la machine électrique, à mesure qu'elle se charge l'étincelle part entre le crochet et l'armature, et de longues et brillantes étincelles éclatent sur la limaille.

Le *tube étincelant* est formé d'un tube de verre d'un mètre de longueur environ, dans lequel on a collé une série de petites feuilles d'étain taillées en forme de losange et disposées en hélice tout le long du tube, de manière à ne laisser entre elles que des solutions de continuité fort petites. Aux extrémités sont deux viroles de cuivre avec crochet, communiquant avec les deux bouts de l'hélice. Si, tenant le tube par un bout, on présente l'autre à la machine électrique (fig. 914), des étincelles jaillissent simultanément à chaque solution de continuité, et produisent une traînée lumineuse très brillante, surtout dans l'obscurité.

Fig. 914.

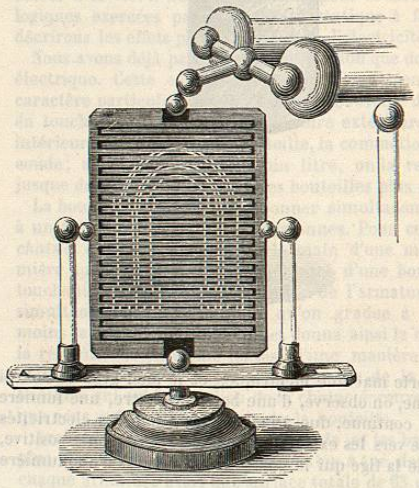

Fig. 915.

Le *carreau étincelant* ou *magique*, fondé sur le même principe que le tube étincelant, se compose d'un carreau de verre ordinaire sur lequel est collée une bande d'étain très étroite, se repliant un grand nombre de fois parallèlement à elle-même, comme le montre le trait noir dans la figure 915. Sur cette bande d'étain

on pratique, avec un instrument tranchant, des solutions de continuité très petites, disposées de manière à représenter un objet déterminé, par exemple un portique, une fleur, etc. ; puis, fixant le carreau entre deux colonnes de verre, on met l'extrémité supérieure de la bande d'étain presque en contact avec la machine électrique, et l'on fait communiquer l'autre extrémité avec le sol. Dès que la machine fonctionne, l'étincelle jaillit à chaque solution de continuité, et reproduit en traits de feu l'objet qu'on a figuré sur le verre.

979. **Effets calorifiques. — Portraits électriques.** — L'étincelle électrique n'est pas seulement lumineuse, elle est aussi une source de chaleur très intense.

En traversant les liquides combustibles, comme l'alcool, l'éther, elle les enflamme ; elle agit de même sur la poudre à canon, la résine pulvérisée, et fond même les métaux : mais alors il faut une batterie puissante.

Une bouteille de Leyde ordinaire suffit pour enflammer l'alcool et l'éther. Pour cela, on prend un petit vase de verre dont le fond est traversé par une tige de cuivre à bouton, fixée à un pied de même métal (fig. 916). Ayant versé le liquide dans le vase de manière que le bouton soit entièrement recouvert, on présente à celui-ci le crochet d'une bouteille de Leyde chargée, en ayant soin de faire communiquer le pied de cuivre avec l'armature extérieure au moyen d'un fil métallique. Ce fil et le pied du vase remplissant l'office d'excitateur, l'étincelle jaillit au travers du liquide et l'enflamme. Avec l'éther, l'expérience réussit très bien ; pour réussir facilement avec l'alcool, il faut d'avance chauffer un peu le liquide.

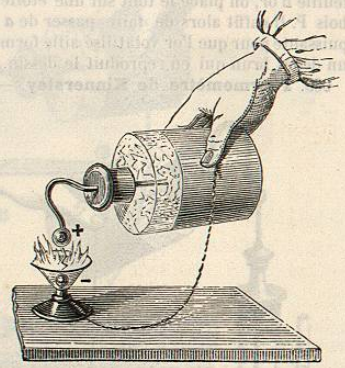

Fig. 916.

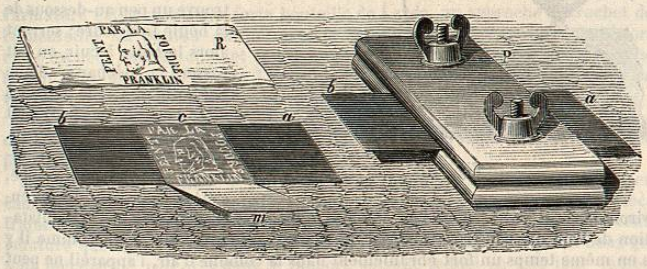

Fig. 917.

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une batterie dans un fil de fer, il devient rouge blanc, fond et brûle avec une lumière éblouissante. Les fils de platine d'or, d'argent sont fondus et volatilisés. Van Marum, avec une forte machine à

deux plateaux et une puissante batterie, a fondu un fil de fer de 16 mètres de longueur.

Si l'on soumet à la décharge d'une batterie une feuille d'or isolée entre deux lames de verre ou entre deux rubans de soie, l'or est volatilisé, et l'on a pour résidu une poudre violette, qui n'est autre chose que de l'or très divisé. C'est ainsi qu'on obtient les *portraits électriques*.

Expérience du portrait de Franklin. — Une feuille de carton mince étant taillée comme on le voit en *abm* (fig. 917), on découpe à jour, en son milieu, le portrait qu'on veut reproduire; puis on colle sur ses extrémités deux bandes d'étain *a* et *b*. Sur la découpure on pose une de ces feuilles d'or extrêmement minces que préparent les batteurs d'or, en ayant soin qu'elle déborde sur les deux feuilles d'étain; puis, après avoir rabattu la portion *m* du carton sur la feuille d'or, on place le tout sur une étoffe de soie blanche dans une presse de bois P. Il suffit alors de faire passer de *a* en *b* la décharge d'une batterie peu puissante pour que l'or volatilisé aille former sur la soie, à travers la découpure, un dépôt brun qui en reproduit le dessin.

980. **Thermomètre de Kinnersley.** — Pour montrer l'effet calorifique de l'étincelle électrique, on se sert encore de l'appareil suivant, connu sous le nom de *thermomètre de Kinnersley*. Il se compose d'un fort tube de verre mastiqué, à ses deux bouts, dans des garnitures de cuivre qui ferment hermétiquement et supportent deux conducteurs terminés en boule, l'un fixe, l'autre glissant dans une boîte à cuir (fig. 918). Latéralement est un second tube ouvert à sa partie supérieure. Ayant dévissé la boîte à cuir, on verse de l'eau dans le gros tube jusqu'à ce que le niveau se trouve un peu au-dessous de la boule inférieure; serrant alors la boîte à cuir, on fait passer la décharge d'une bouteille de Leyde entre les deux boules, en s'y prenant comme le montre le dessin. L'eau, instantanément refoulée hors du gros tube, s'élève de 2 centimètres environ dans le petit; d'où l'on conclut qu'il y a eu échauffement et dilatation de l'air dans le gros tube par le passage de l'étincelle; mais comme il y a en même temps un fort ébranlement dans la colonne d'air, l'appareil ne peut servir à mesurer l'échauffement, et la dénomination de thermomètre qu'on lui donne n'est pas exacte.

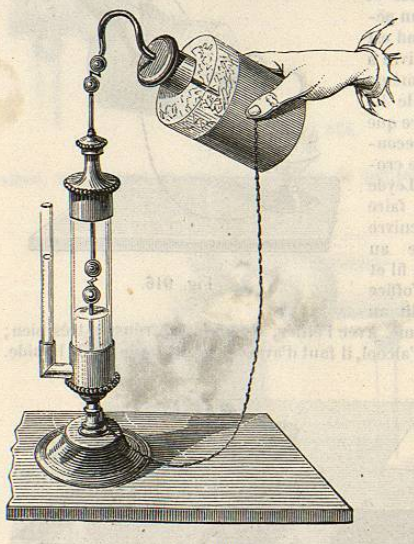

Fig. 918.

981. **Effets mécaniques.** — Les effets mécaniques sont des déchirements, des ruptures, des expansions violentes, qui résultent, dans les corps peu conducteurs, du passage d'une forte décharge électrique. Le verre est percé; le bois, les pierres sont brisés; les gaz et les liquides sont fortement ébranlés.

Les effets mécaniques de l'étincelle électrique se montrent au moyen de différents appareils classiques, qui sont le *perce-verre* et le *perce-carte*.

Expérience du perce-verre. — L'appareil se compose de deux colonnes de verre qui supportent, au moyen d'une traverse horizontale, un conducteur B, terminé en pointe (fig. 919). La lame de verre A, qu'il s'agit de percer, repose sur un cylindre de verre, dans lequel est un second conducteur, ainsi terminé en pointe. Celui-ci étant mis en communication, par un fil métallique, avec

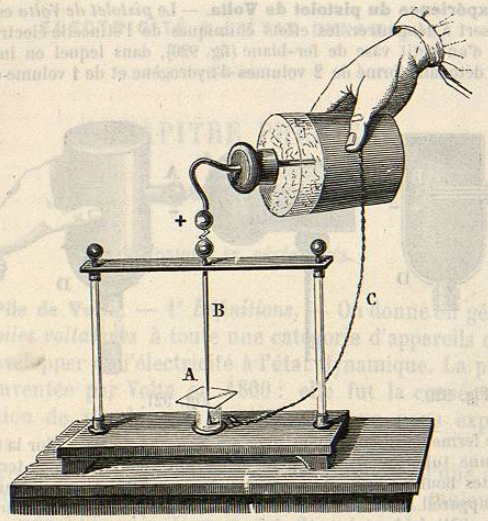

Fig. 919.

l'armature extérieure d'une forte bouteille de Leyde, on approche le crochet de la bouteille du bouton qui termine le conducteur B. L'étincelle éclate alors entre les deux conducteurs, et le verre est percé. Toutefois cette expérience ne réussit avec une bouteille de Leyde un peu forte qu'autant que la lame de verre est mince; autrement il faut faire usage d'une batterie.

Expérience du perce-carte. — Le même appareil sert très bien de perce-carte : il suffit de substituer une feuille de carton à la lame de verre employée précédemment.

982. **Effets chimiques.** — Les effets chimiques de l'électricité consistent en combinaisons et en décompositions produites sur le passage de l'étincelle électrique dans les corps qu'elle traverse. Ces effets paraissent dus à la haute température que fait naître le passage de l'élincelle. Par exemple, quand deux gaz sont mélangés à peu près dans le rapport suivant lequel se fait leur combinaison, une seule étincelle suffit pour la déterminer; mais si le mélange est loin de ce rapport, la combinaison exige une longue série d'étincelles. Priestley reconnut le premier que, lorsqu'on fait passer pendant longtemps des étincelles électriques au travers d'une quantité déterminée d'air atmosphérique, le volume d'air diminue, et de la teinture de tournesol, introduite dans le vase qui le contient, rougit. Cavendish, ayant répété cette expérience avec soin,

trouva qu'il se formait, en présence de l'eau ou des bases, de l'acide azotique résultant de la combinaison de l'oxygène et de l'azote de l'air.

Un grand nombre de gaz sont décomposés par l'action prolongée de l'étincelle électrique. L'hydrogène carboné, l'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, le sont complètement; l'acide carbonique ne l'est qu'en partie, en oxygène et en oxyde de carbone. L'étincelle des machines décompose même les oxydes, l'eau et les sels; mais l'électricité statique est loin de présenter des effets chimiques aussi énergiques et aussi variés que l'électricité dynamique.

983. **Expérience du pistolet de Volta.** — Le *pistolet de Volta* est un appareil qui sert à démontrer les effets chimiques de l'étincelle électrique. Il se compose d'un petit vase de fer-blanc (fig. 920), dans lequel on introduit un mélange détonant formé de 2 volumes d'hydrogène et de 1 volume d'oxygène;

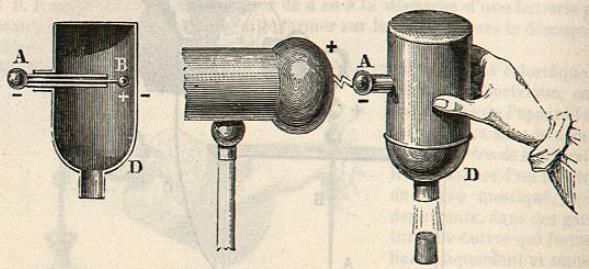

Fig. 920. Fig. 921.

puis on le ferme hermétiquement avec un bouchon de liège. Sur la paroi latérale est une tubulure dans laquelle passe une tige métallique terminée par deux petites boules A et B, et mastiquée dans un tube de verre, qui l'isole du reste de l'appareil. Tenant celui-ci à la main, on l'approche de la machine électrique (fig. 921). Le bouton A s'électrisant alors négativement par influence, et le bouton B positivement, l'étincelle part entre le bouton A et la machine, et, dans le même instant, une deuxième étincelle jaillit entre le bouton B et la paroi du vase qui communique avec le sol par la main. C'est cette dernière étincelle qui détermine la combinaison des deux gaz. Cette combinaison étant accompagnée d'un vif dégagement de chaleur, la vapeur d'eau qui prend naissance acquiert une force expansive telle, que le bouchon est projeté avec une détonation égale à celle d'un coup de pistolet.

L'*eudiomètre*, dont on se sert en chimie pour faire l'analyse des gaz, est une application du pistolet de Volta.

LIVRE XI

ÉLECTRICITÉ A L'ÉTAT DYNAMIQUE

CHAPITRE PREMIER

PILE VOLTAÏQUE.

HISTORIQUE ET GÉNÉRALITÉS.

984. **Pile de Volta.** — 1° *Définitions.* — On donne en général le nom de *piles voltaïques* à toute une catégorie d'appareils qui servent à développer de l'électricité à l'état dynamique. La première pile fut inventée par Volta en 1800 : elle fut la conséquence et l'application de nombreuses expériences, que nous exposerons ci-dessous.

2° *Description de l'appareil.* — Il se compose d'une suite de *couples* ou *éléments*, *empilés* les uns sur les autres, toujours dans le même ordre. Chaque élément est formé par la superposition d'un disque de cuivre, un disque de zinc et une rondelle de drap, mouillée d'eau acidulée : les deux disques métalliques sont soudés, pour que leur contact soit mieux établi et soit préservé de l'oxydation (fig. 922). On maintient solidement tous ces couples superposés entre trois tiges ou colonnes de verre. C'est cette disposition qui a fait donner à l'appareil le nom de *pile*, qui lui est resté, quoiqu'on ait adopté depuis des formes très variées; celle-ci est appelée *pile à colonnes* ou *pile de Volta*.

3° *Production de l'électricité dans la pile. — Loi des forces électromotrices.* — Il résulte des expériences de Volta et de plusieurs autres physiciens qu'il faut considérer l'*élément voltaïque* (zinc-cuivre-eau acidulée) comme formant une chaîne continue, dans laquelle une différence de potentiels s'établit successivement entre chacune des substances en contact. Il s'établit une première différence entre le zinc et le cuivre, une deuxième entre le cuivre et l'eau acidulée, une troisième entre l'eau acidulée et le zinc. Ces différences de potentiels successives obéissent à la loi suivante,