On appelle système aslatique l'ensemble de deux arguilles aimantées au même degré et réunies parallèlement, les pôles contraires en regard, comme le montre la figure 832. Si les pôles sont rigoureusement de même intensité, les actions contraires du magnétisme terrestre sur les pôles en regard se détruisent deux à deux et le système est astatique. On verra une application importante d'un pareil système dans le galvanomètre.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME DANS LES BARREAUX AIMANTÉS.
PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

DISTRIBUTION DU MAGNÉTISME.

869. Expériences de Coulomb. — Nous avons démontré que l'action tellurique sur un aimant se réduit à un couple dont les forces opposées sont appliquées en deux points distincts appelés pôles de l'aimant. Mais un aimant ne possède pas la propriété magnétique en ces deux points seulement : elle existe dans les différentes tranches du barreau, mais à des degrés inégaux.

Pour déterminer la distribution du magnétisme dans un aimant, Coulomb a étudié l'action exercée isolément par les différentes tranches du barreau sur un même pôle d'aimant qu'il plaçait successivement à une même distance de chacune d'elles. Il a employé deux méthodes : la méthode de la balance et la méthode des oscillations. Nous n'indiquerons que la deuxième.

Méthode des oscillations. —Il prenaît une aiguille aimantée courte et fortement trempée, et il la suspendait à un fil de cocon sans torsion. Il la faisait osciller horizontalement: 1° sous l'action de la terre seule; 2° sous la double influence de la terre et du barreau placé devant l'aiguille, dans le plan du méridien magnétique. Il comptait les nombres n et n' des oscillations exécutées en une seconde dans les deux cas. On avait successivement

$$\frac{1}{n} = t = \pi \sqrt{\frac{\Sigma m r^2}{2l_{\mu}H_t}}$$

et

$$\frac{1}{n'} = t' = \pi \sqrt{\frac{\Sigma m r^2}{2l_{\mu}(\mathbf{H}_1 + \varphi')}}$$

tisme du pôle de la petite aiguille. Il admettait que l'action resultante de toutes les tranches qui, dans une position donnée du pôle agissent au-dessus et au-dessus de la tranche étudiée, est proportionnelle à l'action de cette tranche isolée.

On déduisait des formules précédentes

$$\frac{{n'}^2}{n^2} = \frac{t^2}{t'^2} = \frac{\mathrm{H_4} + \varphi'}{\mathrm{T}}, \quad \text{d'où} \quad \frac{\varphi'}{\mathrm{H_4}} = \frac{{n'}^2 - n^2}{n^2}.$$

Pour une autre tranche on avait

$$\frac{\phi''}{H_1} = \frac{n''^2 - n^2}{n^2}.$$

De là on pouvait déduire le rapport $\frac{v'}{v''}$ des actions de deux tranches diffé-

rentes du barreau, descendues uccessivement dans le plan horizontal de la petite aiguille.

870. **Résultats.** — 1° *Courbe du magnétisme*. — Coulomb a étudié des fils cylindriques, de 4 millimètres de diamètre, faits du même acier et fortement trempés. Il les aimantait tous à saturation. Ayant déterminé les actions φ' , φ'' ,...

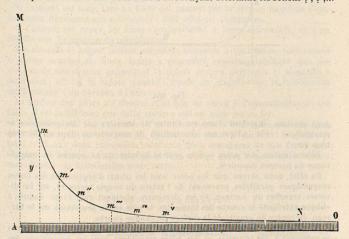


Fig. 835.

des diverses tranches m, m', il les représentait graphiquement. Pour cela on élève en chaque point du barreau une ordonnée proportionnelle à l'action o correspondante, et par suite à la quantité de magnétisme qu'on suppose concentrée dans cette tranche. On a ainsi la courbe de la figure 855. On voit que l'ordonnée, et par suite la quantité de magnétisme, va en croissant depuis un point N, voisin du milieu, où elle est nulle, jusqu'à l'extrémité A du barreau, où elle est maximum. A l'autre moitié du barreau correspond une autre courbe, identique à celle-ci, figurative du magnétisme boréal. On la distingue de la précédente en élevant des ordonnées négatives. La courbe complète du

q' représente l'action des diverses tranches du barreau sur l'unité du magné-

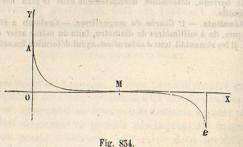
magnétisme a donc deux branches symétriques par rapport au milieu du barreau (fig. 834).

Biot a calculé l'équation de cette courbe. Il a trouvé

$$y = A \left[\mu^{-x} - \mu^{-2l-x} \right];$$

2l est la longueur du barreau, μ est une constante spéciale au barreau, Λ est une autre constante qui caractérise le degré d'aimantation (c'est l'action exercée à l'extrémité), x est la distance, comptée à partir de l'extrémité, de la tranche où l'action est y.

La constante μ augmente avec la trempe de l'acier : la courbe est alors moins allongée; μ diminue par le recuit. Lorsque la longueur du barreau varie, la courbe magnétique reste la même, pourvu que la longueur totale soit supérieure à 16 centimètres : cela n'entraîne donc qu'une variation de longueur de la région neutre. Si le barreau devient plus court, les deux portions de courbe se rejoignent (fig. 834). Il peut même arriver que les



deux portions empiètent l'une sur l'autre de manière que les ordonnées se retranchent : cela indique une diminution de magnétisme dans un barreau trop court.

Détermination des pôles. — Elle peut se déduire de la courbe du magnétisme du barreau considéré.

En effet, nous savons que les pôles sont les points d'application des forces magnétiques parallèles, provenant de l'action du couple terrestre, sur les diverses tranches du barreau. Or on démontre aisément que, étant donnée à chaque extrémité la courbe des intensités, le pôle est la projection sur le barreau du centre de gravité de la surface de chaque courbe.

Pour un barreau court; les surfaces limitées par les courbes magnétiques se réduisent à des triangles, et les pôles coïncident avec les projections des centres de gravité de ces triangles.

871. Expériences de Jamin. — Jamin étudia la distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés par une méthode nouvelle, qui le conduisit aux résultats suivants.

I. Verification de la formule empirique. — Il a d'abord justifié l'emploi de la formule empirique du magnétisme pour des barreaux d'acier de formes variées et de provenances différentes.

Il a reconnu que la hauteur A de la courbe magnétique à l'extrémité du barreau est invariable pour un même acier de même composition chimique, quelle que soit sa trempe ou quel que soit son recuit.

II. Constitution des aimants. — Jamin admet que les aimants sont constitués

par des filets magnétiques composés d'aimants moléculaires, lesquels se suivent et se rejoignent par leurs pôles de noms contraires.

Sur toute la longueur du barreau, les pôles contraires placés en regard entre deux molécules contiguës se dissimulent de telle sorte que les filets magnétiques n'agissent que par leurs extrémités, où ils ont chacun un pôle de même intensité.

Ils sont disposés parallèlement jusqu'à leurs extrémités ; mais, comme ces extrémités sont constituées par des pôles libres et de même nom qui se repoussent, elles s'épanouissent à la

surface de l'acier en divergeant, de sorte que les filets magnétiques, au lieu de se terminer tous aux deux extrémités du barreau, aboutissent aux divers points de la surface depuis la ligne moyenne jusqu'aux deux bouts (fig. 855).

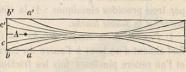


Fig. 835.

Les attractions et les répulsions sont produites par ces pôles extrêmes.

Sur chaque élément superficiel, la quantité de magnétisme libre est proportionnelle au nombre des pôles qui s'y trouvent.

Si l'aimant est long, tous les filets qui passent par la section moyenne s'épanouissent librement aux extrémités : leur effet est maximum.

Si l'aimant est *court*, les filets s'enchevêtrent à leurs extrémités, et il en résulte une diminution du magnétisme.

Des aimants de même section moyenne, aimantés à saturation, contiennent le même nombre de filets. Jamin a démontré expérimentalement que des aimants de même acier présentant la même section moyenne, et aimantés à saturation, offrent la même quantité totale de magnétisme; la distribution seule change d'un barreau à l'autre.

La surface des pôles n'a d'autre effet que de servir à l'épanouissement des filets. Il est indifférent que cette surface soit en acier ou en fer.

Ainsi, l'on prend deux portions d'un même ruban d'acier, l'une très longue, dont le magnétisme total = 40, l'autre très courte, dont le magnétisme total = 12. Aux deux extrémités on adapte deux armatures de tôle de 60 centimètres de longueur chacune : rien n'est changé pour la quantité totale du magnétisme : la distribution seule varie.

PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

872. Sources et méthodes d'aimantation. — Saturation. — Les diverses sources d'aimantation sont les aimants naturels, le magnétisme terrestre et l'électricité. Cette dernière source d'aimantation est la plus puissante : nous ne la ferons connaître que plus tard. Quant aux deux autres sources, elles fournissent deux méthodes pour l'aimantation des barreaux d'acier.

Quelle que soit la méthode employée, on constate qu'il y a une limite à la puissance magnétique que peut acquérir un barreau. Cette limite dépend à la fois des dimensions du barreau, de son degré de trempe et de l'intensité de la source; elle est atteinte lorsque la force coercitive du barreau ne peut maintenir séparées de plus grandes quantités de fluide. On dit alors que le barreau est aimanté à saturation. Lorsque le point de saturation a été dépassé, le barreau y revient bientôt, et tend même à descendre au-dessous, si l'on n'entretient pas sa force magnétique à l'aide d'armures, comme on le verra ci-après (876).

873. Aimantation par les aimants. — Cette méthode s'applique par trois procédés classiques : 1° la simple touche; 2° la touche séparée; 3° la double touche.

1º Procédé de la simple touche. — On fait glisser le pôle d'un fort aimant d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter, et l'on réitère plusieurs fois les frictions, toujours dans le même sens : la dernière extrémité que touche l'aimant mobile présente un pôle de nom contraire au pôle qui sert aux frictions.

REMARQUE. — Ce procédé fut le premier employé, parce qu'il est, en effet, le plus simple. Le simple contact d'un pôle d'aimant suffit, à la rigueur, pour aimanter un barreau d'acier. C'est ainsi qu'on fabriquait dès le xuª siècle des aiguilles de boussole par simple contact avec des pierres d'aimant. Mais on découvrit bientôt que l'action de l'aimant s'accèlère et s'accentue par la friction. L'ébranlement moléculaire qui en résulte favorise évidemment l'orientation des particules magnétiques.

Ce procédé, qui fut longtemps le seul employé, a l'inconvénient de ne donner qu'une aimantation faible et irrégulière, parce que le pôle d'aimant développe un champ magnétique d'intensité faible et variable. Il ne suffit pas pour produire la saturation et ne peut servir que pour de petits barreaux. De plus il a l'inconvénient (comme le procédé par simple contact) de produire des points conséquents, surtout si la lame à aimanter est un peu longue et d'un acier un peu dur.

2º Procédé de la touche séparée. — C'est en réalité le procédé de la simple touche, appliqué simultanément aux deux moitiés du barreau à aimanter. En effet, on place les deux pôles contraires de deux barreaux d'égale force au milieu du barreau à aimanter, et on les fait glisser simultanément chacun vers un des bouts du barreau, en les tenant inclinés, chacun, sous un angle de 25º à 30º (fig. 836). On ramène ensuite chaque aimant vers le milieu du barreau, et l'on recommence de la même manière. Après plusieurs frictions semblables sur les deux faces, le barreau est aimanté.

On accélère et l'on augmente l'aimantation en plaçant les deux bouts du barreau à aimanter sur les pôles contraires b et a' de deux aimants fixes ab et a'b' dont l'influence s'ajoute aux actions des aimants mobiles AB et A'B'. Le barreau frotté acquiert des pôles M et N, de noms contraires aux pôles B, B', A, A' des aimants influents.

Ce procédé donne l'aimantation la plus complète et la plus ré-

gulière; aussi est-il appliqué de préférence aux aiguilles de boussole et aux lames minces dont l'épaisseur ne dépasse pas 5 millimètres.

REMARQUE. — Le procédé de la touche séparée fut inventé en 1750 par Savery et employé quelques années plus tard, en 1745, pour fabriquer des aimants d'une puissance inconnue jusqu'à lui. Knight couchait la lame à aimanter sur deux

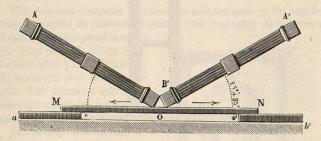


Fig. 856.

aimants placés horizontalement, opposés par leurs pôles et séparés par un petit intervalle; puis il retirait simultanément les deux aimants inducteurs de dessous la lame : celle-ci s'aimantait par suite de l'influence magnétique renforcée par le frottement.

Duhamel étudia ce procédé en 1760 et le perfectionna au point qu'on l'appelle souvent procédé de Duhamel. Il plaça les aimants inducteurs au-dessus de la lame, et non au-dessous, ce qui rend la manœuvre plus commode, et en les inclinant sur l'horizon.

Enfin Coulomb employa le même procédé en 1793, en l'améliorant par l'addition des aimants fixes.

3° Procédé de la double touche. — Le meilleur de ces anciens procédés d'aimantation était celui de la double touche, indiqué pour la première fois, en 1751, par Mittchell ¹.

Les deux aimants qui servent à opérer les frictions sont encore placés au milieu du barreau à aimanter, leurs pôles contraires en regard; mais, au lieu de glisser en sens contraires vers ses extrémités, ils sont maintenus à une distance fixe au moyen d'une cale non magnétique placée entre eux (fig. 837). On les fait glisser ensemble depuis le milieu jusqu'à une extrémité, puis de celle-ci à l'autre extrémité, et ainsi de suite, de manière que chaque moitié du barreau reçoive le même nombre de frictions. Le champ magnétique d'influence était considérablement renforcé, dans l'intervalle des deux pôles, par leur action simultanée.

^{1.} Ce procédé est signalé dans son Treatise on artificial magnets (Cambridge, 1751).

Æpinus, en 1758, perfectionna cette méthode en plaçant, comme dans le procédé de la touche séparée, deux forts barreaux sous celui qu'on veut aimanter, et en inclinant les barreaux mo-

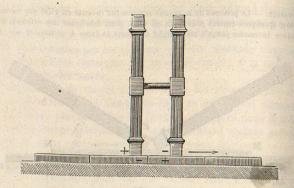


Fig. 837.

biles d'un angle de 15 à 20 degrés (fig. 858). Ce procédé est le plus énergique de tous, et peut servir à aimanter de forts barreaux; mais il donne souvent des points conséquents.

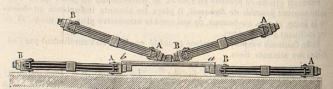


Fig. 858.

874. Aimantation par l'action de la terre. — L'action de la terre sur les substances magnétiques étant comparable à celle des aimants, le magnétisme terrestre tend constamment à orienter les molécules magnétiques et, par suite, à produire l'aimantation dans le fer et dans l'acier. Mais l'action tellurique étant relativement faible, à cause de la distance, ne peut opérer d'effets que sur les substances douées d'une force coercitive peu intense. Ainsi une barre de fer doux, ou même d'acier non trempé, s'aimante lorsqu'on la place dans le méridien magnétique, parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, tandis qu'une barre d'acier trempé n'est nullement influencée. Toutefois on n'a ainsi qu'une aimantation instable; car si l'on retourne la barre, les pôles sont aussitôt intervertis et, si on l'écarte du méridien magnétique, le magnétisme disparaît complètement.

Cependant on parvient à donner au fer doux une force coercitive sensible, si, tandis qu'il est sous l'influence de la terre, on le soumet à une action mécanique brusque et intense, telle qu'une forte torsion, ou un martelage à froid

sur une enclume. Mais la force coercitive ainsi développée est faible et se perd bientôt complètement : ce qui n'a pas lieu pour l'acier.

REMARQUE. — C'est par l'influence prolongée du magnétisme terrestre qu'on explique la formation des aimants naturels, ainsi que l'aimantation spontanée qu'on observe fréquemment dans les vieux outils et autres objets d'acier ou de fer, tels que les clous, les pelles, les pinces, etc. La fonte a une grande force coercitive et s'aimante très bien.

875. Aimants composés ou Faisceaux magnétiques. — On appelle aimant composé ou faisceau magnétique un ensemble de barreaux

aimantés réunis parallèlement par leurs pôles de même nom. La force d'un pareil aimant est de beaucoup plus intense que celle d'un aimant d'une seule pièce qui aurait les mêmes dimensions.

Tantôt on leur donne la forme de fer à cheval (fig. 839) et 843), tantôt une forme rectiligne (fig. 840 et 842). Le faisceau représenté dans la figure 840 est formé de 5 lames d'acier juxtaposées. Celui de la figure 839 se compose de 12 lames disposées en trois couches de 4 lames chacune. La forme de fer à cheval est préférable pour faire porter un poids à l'aimant, car les deux pôles sont utilisés en même temps. Dans les deux espèces de faisceaux, les lames sont

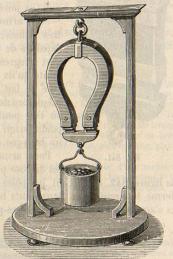


Fig. 859.

trempées et aimantées séparément, puis superposées et réunies par des vis de fer, ou par des viroles de laiton.

876. Armures des aimants. — On nomme armures des pièces de fer doux, telles que A et B (fig. 840), qu'on met perpétuellement



Fig. 840.

en contact avec les pôles des aimants, et qui ont pour effet d'en conserver le magnétisme, et même de l'augmenter.

Fig. 841.

La figure 841 représente une pierre d'aimant munie de ses armures sur les faces qui correspondent aux pôles. Ce sont deux lames de fer doux, terminées chacune par un talon massif. Ces lames s'aimantent sous l'influence de l'aimant naturel : les

pôles A et B de l'aimant naturel font naître dans l'armure des pôles des noms contraires b et a. Or ces armures, une fois aimantées, réagissent à leur tour sur le magnétisme de l'aimant naturel, et accroissent ainsi sa puissance.

Sans armure, les aimants naturels sont très faibles; mais, armés, ils deviennent capables de porter des poids qui augmentent progressivement jusqu'à une certaine limite qu'ils ne peuvent dépasser. On vérifie ce fait en accrochant à l'armure soit un plateau de balance, soit un seau (fig. 839) où l'on peut ajouter progressivement des poids, jusqu'à une limite où il se produit un brusque arrachement.

Pour armer les aimants artificiels, on les dispose par paire, comme le représente

la figure 342, en plaçant les pôles contraires en regard, puis on ferme le circuit avec deux petits barreaux de fer doux AB; ceux-ci s'aimantant par influence, leurs pôles réagissent sur les bar-



Fig. 842.

reaux aimantés pour leur conserver leur force magnétique. Quant aux aiguilles mobiles, comme elles, sont soumises d'une manière permanente à l'action directrice du magnétisme terrestre, cela leur tient lieu d'armure.

REMARQUE. — Portants ou contacts. — Les aimants n'agissent même pas directement par leurs armures, mais par l'intermédiaire d'une autre pièce de fer doux, appelée portant ou contact (fig. 839, 841 et 843). Le portant a'b' (fig. 843), qui est en fer doux, fait lui-même l'office d'une deuxième armure; car il s'aimante par influence et ses pôles a' et b' réagissent sur les pôles a et b de la première.

877. Force portative des aimants. — On apprécie la force magnétique d'un aimant par sa force portative, c'est-à-dire par le poids qu'il peut porter.

La force portative d'un aimant, de substance et de poids donnés, est augmentée par l'adjonction d'un contact. L'accroissement grandit pendant un certain temps jusqu'à une certaine limite, puis il s'annule brusquement dès qu'on arrache le contact. Il se produit, dans ce cas, une sorte de condensation de magnétisme analogue à celle que nous étudierons ci-dessous pour les charges électriques. La force portative est diminuée après ce premier arrachement et se maintient à une valeur minimum constante. Ainsi le grand aimant Jamin ¹, qui portait jusqu'à 800 kilogrammes avant le premier arrachement, n'en porte normalement que 500 depuis le premier arrachement.

Magasins magnétiques de Knight. — Formule de Bernoulli. — Les plus puissants aimants qu'on ait jamais obtenus par les anciens procédés d'aimantation, sont deux faisceaux magnétiques, construits par Knight, et présentés par lui à l'Institut royal britannique, sous le nom de magasins magnétiques. Ils étaient formés chacun de 240 lames de 15 pouces et pesaient chacun 500 livres. En 1830, ils furent essayés par Faraday, et il fallait encore une force de cent livres pour arracher un cylindre de fer doux, d'environ un pied de long, placé entre les deux pòles.

La force portative de ces anciens aimants était déterminée d'une manière très approchée par une formule empirique due à Bernoulli. En appelant P le poids de l'aimant, et a une constante, caractéristique de la substance, on a

$$F = a \sqrt[5]{P^z}.$$

878. Aimants Jamin. — M. Jamin a été conduit, par ses recherches sur la distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés, à d'importants résultats relativement à leur *limite de saturation*, à l'influence de leurs armures et de leurs contacts, et à leur *force portative*.

1º Il a vérifié d'abord que la limite de saturation d'un faisceau magnétique était notablement reculée par l'influence des armures qu'on leur applique.

Ainsi, un faisceau magnétique de 5 lames ne portait que 4 kilogrammes environ quand il était dépourvu d'armures, et portait jusqu'à 140 kilogrammes lorsqu'il était muni de deux armures de 550 centimètres carrés.

Il faut remarquer d'ailleurs que l'influence des armures ne se produit que si l'on procède à l'aimantation sur l'ensemble de l'aimant et de ses armures réunis.

2° Les contacts d'un aimant doivent avoir un grand périmètre et une faible longueur et la surface d'adhérence ne doit pas dépasser une certaine limite.

5° La limite de l'aimantation normale dépend de la qualité des aciers, ainsi que de la longueur des barreaux.

4º La force portative d'une lame augmente avec l'épaisseur, mais moins ra-

^{1.} Cet aimant, qui a figuré à l'Exposition universelle de 1867, est conservé au Laboratoire des recherches physiques de la Sorbonne.

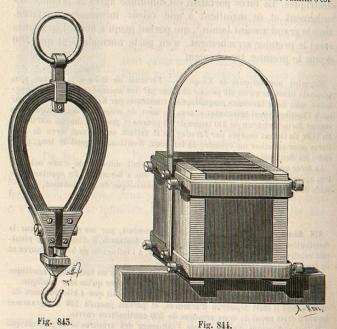
pidement que la proportionnalité. Il a donc substitué aux lames d'acier épaisses dont on faisait usage pour construire les faisceaux magnétiques, des lames très minces, aimantées à saturation et superposées en nombre suffisant.

Les aciers récents et courts prennent seulement une aimantation superficielle, tandis que les aciers trempés et longs s'aimantent à peu près uniformément

dans toute leur épaisseur.

Les aciers trempés très carburés sont difficiles à aimanter, mais très perméables à l'aimantation, tandis que les aciers récents et peu carburés prennent aisément une aimantation superficielle, qui ne pénètre pas dans l'épaisseur des barreaux.

879. Force portative des nouveaux aimants. — La figure 845 représente un aimant en fer à cheval construit d'après les indications de Jamin. C'est



un faisceau de lames d'acier fortement recourbées, et munies d'armures en fer doux : celles-ci sont séparées par une pièce en laiton et solidement vissées entre elles et avec les lames. La figure 844 représente un autre aimant Jamin. C'est un faisceau de lames rectangulaires s'appuyant par leurs pôles sur d'ux armures épaisses en fer doux. Le contact est une barre prismatique en ler doux.

Ces aimants sont d'ailleurs formés, non point à l'aide des anciens procédés magnétiques, mais à l'aide du procédé électrique, découvert par Arago (1071), procédé infiniment supérieur au point de vue de la rapidité, de la régularité et de l'intensité d'aimantation.

La force portative qui en résulte dépasse de beaucoup celle qu'on pourrait déduire de l'application de la formule de Bernoulli. Ainsi, pour le grand aimant Jamin, on n'obtiendrait que F=260 kilogrammes (tandis que la force mesurée était de 800), même en prenant pour la constante a la valeur 19,5 (caractérisque des aciers d'Harlem), que les aciers employés par Bernoulli étaient très éloignés d'atteindre.

La différence est encore plus sensible pour les aimants de faible poids. Ainsi un aimant laminaire Jamin, du poids de 500 grammes, qui, d'après la formule de Bernoulli n'aurait qu'une force portative de 1200 grammes, a acquis entre les mains de Jamin (par les nouveaux procédés) une force portative de 25 kilogrammes (environ 21 fois son poids) 4.

1. On a pu voir à l'Exposition internationale d'électricité (janvier 1885) une série de petits aimants en fer à cheval, en acier Clémandot, dont la force portative était non moins remarquable. L'un d'eux, du poids de 820 grammes, portait 17 kilogrammes (c'est à-dire 21 fois son poids); un autre, du poids de 1007 grammes, portait 25 kilogrammes (environ 25 fois son poids).

ceserant électrique. L'ensemble des tots relatives à la première catégorie de ces parsonières électriques constitue l'éversule à l'état statique (en en ropes), qu'on appelle simplement électrique atatique; l'ensemble des autrès phénomènes constitue l'électrique à l'état dynanques (on en mouvement), qu'on appelle simplement.

Indice's Mide, 600 and word J.-C., avail ally remarque la prophicie que can fundre jumnitation destrier les surjes ligrers. En partent de veits aubtance. Plup dit ; « sund i e tretternent sin a donnée la calment ell que calment fire les brussès données en la que calment elle partent elle pa

GANOT.