

que si l'on présente un cylindre de fer doux devant l'ouverture d'une hélice dans laquelle circule un courant, il est immédiatement attiré, et ne s'arrête que lorsqu'il est placé symétriquement par rapport au milieu de l'hélice. On conçoit que cette

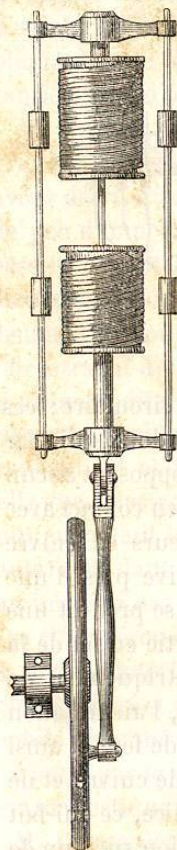


Fig. 371.

action électro-magnétique puisse être utilisée comme force motrice, car, d'après ce que nous venons de voir, elle peut fournir à la masse de fer doux une course considérable, mais on voit qu'il est impossible qu'elle fasse naître un mouvement circulaire primitif, tandis qu'elle donne lieu tout naturellement à un mouvement de va-et-vient; du reste, il est probable que les objections qu'a faites M. Jacobi aux appareils oscillants ne s'appliquent pas dans ce cas, du moins avec autant de rigueur, car il semble naturel de croire que la force avec laquelle le fer doux est entraîné dans l'hélice diminue à mesure qu'il s'y enfonce, puisqu'elle finit par devenir nulle.

La figure 371 représente l'électro-moteur de M. Page; il se compose de deux bobines fixées horizontalement de telle sorte que leurs axes soient dans le prolongement l'un de l'autre; deux cylindres de fer doux joints par une tige de cuivre sont liés à un système de glissières qui leur permet d'osciller parallèlement à l'axe des bobines et qui s'articule à une bielle au moyen de laquelle le mouvement de va-et-vient est transformé en un mouvement circulaire. Le courant passe dans la première hélice, le fer doux correspondant s'y enfonce, ce qui fait sortir le second fer doux de la seconde hélice; par l'intermédiaire d'un commutateur, le courant passe alors de la première à la seconde bobine, qui à son tour agit sur le cylindre de fer doux qui lui correspond, et l'on voit comment se produit ainsi le mouvement de va-et-vient du système mobile. On doit à M. Du-moncez un appareil analogue dans lequel les bobines elles-

mêmes peuvent osciller comme le font les cylindres des machines à vapeur oscillantes, ce qui permet d'articuler directement la tige liée au fer doux avec la manivelle d'une roue.

Après avoir étudié les principaux électromoteurs à un point de vue exclusivement mécanique, c'est-à-dire en nous rendant compte seulement de la disposition de ces appareils et des avantages ou des inconvénients qu'ils présentent pour utiliser les forces que l'électricité dynamique y développe, il est intéressant d'entrer plus avant dans la question, d'analyser ce qui se passe quand une de ces machines est en mouvement, et enfin de comparer, quant à l'effet utile, les forces électro-magnétiques aux autres forces motrices. C'est à M. Jacobi qu'on doit la plupart des notions précises et réellement scientifiques qu'on a acquises sur la théorie des électromoteurs. Il fallait en effet connaître d'abord les lois des électroaimants, c'est-à-dire la manière dont leur magnétisme varie soit avec la nature de l'hélice, c'est-à-dire le nombre de ses tours et la grosseur de son fil, soit avec la forme même, la longueur et la grosseur des fers doux; or c'est là, comme nous l'avons vu, l'objet des recherches de MM. Lenz et Jacobi, qui sont arrivés à des lois sinon très-générales, du moins approchées dans des limites étendues. Mais il restait un autre élément de la question à éclaircir. Considérons un électromoteur en mouvement, celui de M. Jacobi, par exemple, n'exécutant aucun travail utile et n'ayant à vaincre par conséquent que la résistance de l'air et celle qui est due aux divers frottements de la machine; le commutateur rend instantanés les changements de polarité, quelle que soit la rapidité du mouvement; nous admettons que l'excitation électro-magnétique du fer doux se produit aussi d'une manière instantanée, et enfin que l'attraction ou la répulsion des masses magnétiques est indépendante de leurs vitesses relatives. Nous sommes donc en présence d'une force constante qui doit produire un mouvement accéléré que le frottement ne pourra rendre uniforme puisqu'il est indépendant de la vitesse, mais seulement la résistance de l'air qui croît avec elle. Or il est facile, en partant de cette hypo-

thèse, de calculer approximativement la vitesse dont sera animé l'appareil lorsque le mouvement sera devenu uniforme, et on trouve qu'elle est beaucoup plus grande que la vitesse limite qu'on ne peut dépasser. C'était donc dans la force motrice elle-même qu'il fallait chercher la cause de cette limite, et, en partant de ces considérations mécaniques, M. Jacobi a établi nettement l'influence de l'induction. En effet, tout électromoteur en mouvement fonctionne en même temps comme machine magnéto-électrique; indépendamment des extra-courants qui se développent par l'influence des hélices sur elles-mêmes et qui ne naissent du mouvement que parce que le mouvement de l'appareil fait marcher le commutateur, des courants d'induction prennent naissance, ou, si l'on aime mieux, tendent à prendre naissance dans les hélices qui s'approchent ou qui s'éloignent l'une de l'autre, et ces courants marchent, d'après la loi de Lenz, en sens contraires de ceux qui produisent l'aimantation. Il y a donc nécessairement diminution dans l'intensité des courants magnétisants, diminution d'autant plus grande que le mouvement est plus rapide. Dès lors, on voit comment l'augmentation de la vitesse produit une diminution de la force motrice, et comment, quand arrive l'instant où cette force est précisément égale aux résistances passives de la machine, le mouvement devient uniforme. Ainsi, lorsqu'on interpose un galvanomètre dans le circuit, tant qu'on empêche l'électromoteur de fonctionner, l'aiguille est déviée d'un angle constant; mais, dès que le mouvement commence, la déviation de l'aiguille diminue, et elle ne cesse de diminuer que lorsque le mouvement est devenu uniforme. On peut donc dire que le mouvement introduit dans le circuit une résistance qui va en croissant quand il s'accélère; toutefois il faut bien remarquer qu'il n'y a pas là une perte réelle de force, puisque le zinc consommé reste toujours proportionnel à l'intensité du courant, mais seulement réductions simultanées de la dépense et de la force mise en jeu.

En partant des lois déjà citées des électro-aimants, de celles qu'on admet pour les courants d'induction, et enfin des lois générales de Ohm, M. Jacobi a pu soumettre au calcul la théorie

des machines électromotrices¹. Parmi les résultats auxquels il est arrivé, il en est un qui résume à peu près tous les autres et dont nous parlerons ici; c'est l'expression qu'il a trouvée pour le travail maximum qu'est susceptible de donner un électromoteur. On sait que dans une machine en mouvement, le travail moteur est le produit de la force motrice par la vitesse de son point d'application, et que de plus, si le mouvement est uniforme, le travail moteur est égal au travail résistant qui se compose lui-même du travail utile et des résistances passives de la machine. Les électromoteurs jouissent toujours de la propriété d'être susceptibles d'un maximum d'effet utile, propriété à laquelle participent la plupart des autres machines, vu qu'il n'en est presque pas où, parmi les forces agissantes, soit résistantes, soit motrices, il n'y en ait au moins une qui varie avec la vitesse. Or, dans un électromoteur c'est, d'après ce que nous avons vu, la force motrice qui diminue lorsque la vitesse augmente; on comprend donc comment l'expression du travail moteur composée de deux facteurs qui varient en sens contraires doit passer par un maximum, et M. Jacobi a trouvé qu'elle l'atteint, lorsque la vitesse est telle que l'intensité du courant est devenue la moitié de ce qu'elle est, lorsqu'on maintient l'appareil au repos. Mais ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que les hélices des électroaimants n'entrent dans l'expression de ce travail maximum que par leur résistance totale, en sorte que, cette résistance restant la même, on peut augmenter ou diminuer le nombre de leurs spires, sans apporter le moindre changement au maximum de travail, mais en faisant varier seulement ses éléments, c'est-à-dire la force et la vitesse. La disposition du conducteur sur les bobines joue donc ici un rôle analogue à celui d'un organe de transmission dans les machines ordinaires, c'est-à-dire, qu'en la faisant convenablement varier, on peut tout en produisant le maximum de travail moteur, faire marcher l'appareil dans les conditions de vitesse les plus favorables au travail utile qu'on veut effectuer. En outre, ce résultat a ceci d'important qu'il montre l'inutilité des tentatives qu'on a faites,

¹ Voyez la note finale G.

et qu'on pourrait faire pour arriver à des résultats plus avantageux en donnant aux électroaimants de grandes dimensions. En résumé, d'après la théorie de M. Jacobi, le travail maximum qu'on peut obtenir avec une pile donnée, varie suivant l'électromoteur avec un coefficient qui dépend de la disposition générale de l'appareil et de la force coercitive du fer doux qui y est employé; c'est la valeur de ce coefficient qui caractérise une machine électromotrice, et nous nous sommes occupés, en décrivant ces machines, des circonstances qui le font varier. De plus, la force électromotrice de la combinaison voltaïque dont on se sert, entre comme facteur dans l'expression de ce même travail maximum, en sorte qu'à égalité de zinc dissous, une pile de Grove donne $1\frac{2}{3}$ plus de travail qu'une pile de Daniell, mais le rapport du travail obtenu au zinc dépensé est indépendant de la disposition de la batterie. Ces résultats obtenus par M. Jacobi ont l'avantage d'éclaircir les notions vagues qu'on avait avant lui sur toute cette théorie, et d'établir nettement quels sont les organes des électromoteurs qui sont susceptibles de perfectionnement. C'est d'une part la disposition générale de l'appareil, sans comprendre dans cet ensemble de conditions diverses, celles qui sont relatives à la construction des électroaimants, et de l'autre la force électromotrice de la pile et non pas la manière dont elle est disposée.

La théorie qu'ont donnée des électromoteurs MM. Joule et Scoresby repose sur l'hypothèse de la transformation de la chaleur en travail mécanique. M. Joule a démontré que, si toute la chaleur développée par la solution d'un grain de zinc dans la pile de Daniell était utilisée, son pouvoir mécanique, qu'on déduit de l'équivalent mécanique de la chaleur, serait représenté par un poids de 150 livres élevé à la hauteur d'un pied. D'un autre côté, on admet que cette chaleur chimique se transforme, soit en effets calorifiques, soit en effets mécaniques dans le circuit. Considérons maintenant un électromoteur dans lequel le courant circule, mais qui est maintenu au repos et soit a l'intensité du courant. Si on laisse marcher l'appareil, l'intensité du courant diminue et devient b . Les quantités de chaleur développées dans les deux cas sont entre elles comme

$a^2 : b^2$; mais le travail total, tant calorifique que mécanique, doit toujours être dans un rapport constant avec l'intensité du courant ou, ce qui revient au même, avec la quantité de zinc consommée. Il faut donc que dans le second cas la quantité x de travail mécanique soit telle que l'on ait :

$$b^2 + x : b = a^2 : a;$$

puisque dans le premier cas le travail calorifique était le travail total; le rapport du travail mécanique au travail total est exprimé par

$$\frac{x}{b^2 + x};$$

et on trouve :

$$\frac{x}{b^2 + x} = \frac{a - b}{a}$$

Or nous savons que 1 grain de zinc consommé donnerait, s'il était utilisé tout entier, un travail représenté par 158; il donnera donc ici :

$$158 \left(\frac{a - b}{a} \right)$$

MM. Joule et Scoresby ont appliqué cette formule à un assez grand nombre d'expériences. Ils ont trouvé en moyenne avec leurs appareils un travail théorique déduit de leur formule de 78 liv. 5 onces par grain de zinc, et celui qu'ils ont réellement obtenu ne va qu'à 65 liv. 6 onces par grain, en sorte que le travail effectif doit être considéré, suivant eux, comme égal aux $\frac{4}{5}$ du travail théorique, dans les conditions où ils se trouvaient.

Cette théorie des électromoteurs, qui ne peut évidemment rien éclaircir sur les perfectionnements à apporter à ces machines, et qui exprime seulement la transformation de la chaleur développée par une action chimique en travail mécanique, permet de comparer immédiatement, sous le rapport de leur utilité, les machines électromotrices avec les machines à vapeur, car, dans celles-ci, c'est aussi la chaleur dégagée par une action chimique qui se transforme en un travail mécanique. Les cal-

culs de MM. Scoresby et Joule et les résultats obtenus déjà par Oersted et depuis par M. Hunt s'accordent à très-peu de chose près; 1 grain de charbon consommé dans le fourneau d'une machine de Cornouailles, a soulevé 143 livres à 1 pied, tandis que 1 grain de zinc consommé dans une batterie voltaïque ne peut soulever théoriquement que 80 livres. Le prix d'un quintal de charbon est inférieur à 9 pences, tandis que celui d'un quintal de zinc est au-dessus de 216 pences, d'où il résulterait que dans les meilleures conditions, la force magnétique est 25 fois plus chère que celle de la vapeur.

Des recherches ont été faites à ce sujet par M. E. Becquerel, dans le but de constater devant le Jury de l'Exposition universelle, la puissance mécanique et la dépense de quelques électromoteurs; en voici les résultats tels qu'ils ont été exposés par M. Becquerel lui-même.

NATURE de L'ÉLECTRO-MOTEUR.	ÉTAT DE LA PILE.		Travail du moteur sans volta-mètre.	Travail du moteur avec volta-mètre.	Consommation de zinc par heure et par kilomètre.	Consommation de zinc par heure et par cheval de force.	
	NOMBRE D'ÉLÉMENTS.	Surface totale du zinc de chaque élément.					
Appareils.	Éléments.	Décimètr. carré.	Kilogramme.	Kilogramme.	Grammes.	Kilogrammes.	
MACHINES ROTATIVES.	Appareil Larmerjeat armatures roulant sur les électroaimants.	20 simples. Zinc intérieurement	0,85	0,836	0,720	160	12,000
		10 doubles —	1,70	»	0,484	203	15,200
		10 triples —	2,55	1,028	0,900	60	4,500
		10 quadruples —	3,40	1,280	0,960	61	4,575
		10 quadruples —	3,40	2,514	0,863	137	10,250
MACHINES OSCILLANTES.	Appareil Roux.	10 triples —	2,55	0,829	0,562	174	13,050
		10 simples —	0,85	»	0,450	142	10,680
		10 doubles —	1,70	1,052	0,584	144	10,800
		10 triples —	2,55	1,550	0,850	132	9,900
		10 quadruples —	3,40	3,660	1,500	88,7	6,640
		8 Zinc extérieurement	21,00	1,600	1,330	44,0	3,300
		6 —	21,00	0,600	0,415	28,9	2,200
	Appareil Favre et Kunemann.	24 simples. Zinc intérieurement	0,8 ⁵	»	0,512	»	»
		12 doubles —	1,7 ⁰	0,428	»	»	»
		12 doubles —	»	0,402	»	»	»
12 doubles —		»	»	0,226	422	31,700	

Nous remarquerons seulement que M. Becquerel ne paraît pas s'être préoccupé de faire marcher les divers appareils, de façon à leur faire donner à chacun leur maximum de travail, ce qui eût été un élément important dans la détermination de leurs valeurs relatives. On a choisi les quatre appareils qui, d'après leurs dimensions, ont permis d'y adopter un frein dynamométrique. Ces appareils étaient : 1° une machine construite par M. Larmerjeat et déjà citée plus haut; 2° une machine construite par M. Loiseau et analogue à la machine rotative de M. Jacobi, avec cette différence, que les courants, à l'aide d'un répartiteur, ne passent dans les électroaimants en présence que lorsqu'ils sont à peu de distance l'un de l'autre; 3° une machine oscillante imaginée par M. Roux, et dans laquelle des plaques de fer s'approchent et s'éloignent successivement d'électroaimants fixes et verticaux, mais disposés de manière à utiliser l'action magnétique du fil des électroaimants sur une armature en fer doux extérieure; ces électroaimants sont de la forme de ceux que M. Nicklès a nommés trifurqués; les plaques de fer doux ont un mouvement de va et vient qui se transmet à un arbre et donne un mouvement de rotation continu; 4° enfin une machine oscillante construite par MM. Favre et Kunemann. La quantité de travail a été donnée à l'aide du frein dynamométrique. Afin de connaître la dépense en électricité, on a fait passer le courant électrique circulant dans la machine dans un voltamètre à sulfate de cuivre; le sel a été décomposé, et du cuivre métallique s'est précipité au pôle négatif pendant que l'électrode positive se rongait. Il y a une petite différence entre le poids du dépôt au pôle — et la perte de poids au pôle +; mais pour les expériences de cette nature elle est insignifiante, et on prend la moyenne des deux déterminations. Or, comme dans chaque élément de pile, le travail chimique est le même que dans le voltamètre, il est donc facile d'évaluer la quantité de zinc dissous dans chaque couple, d'après la quantité de cuivre déposée dans le voltamètre; en multipliant ce nombre par le nombre des éléments de la pile on en déduit la consommation totale du zinc. On peut donc, dans un temps donné, avoir par cette mé-

thode, et la quantité de travail donné par le frein (colonne 5 du tableau ci-dessus) et la dépense indiquée par la consommation du zinc (colonne 6 du tableau). Les éléments de pile employés, sauf dans les deux dernières faites avec l'appareil Roux, étaient des éléments de Bunzen de petit modèle ayant des vases poreux de 125 millimètres de hauteur sur 50 millimètres de diamètre.

§ 3. Application à la télégraphie.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent les tentatives qu'on a faites pour appliquer les propriétés magnétiques du courant électrique à la construction d'un moteur mécanique. Au point de vue de l'économie et de la puissance, ce moteur est très-inférieur à ceux qui sont usuellement employés et en particulier à la vapeur; mais il possède un caractère spécial qui le rend propre à des usages auxquels il peut seul être adapté. Ce caractère, c'est la distance illimitée à laquelle il peut agir. Il est comme un bras qui a le pouvoir de s'allonger indéfiniment pour porter sa main là où il y a une action à exercer. Partout donc où une grande force ne sera pas indispensable, et où il y aura nécessité d'agir instantanément à une distance plus ou moins grande du lieu d'où l'action doit partir, la puissance magnétique du courant électrique deviendra l'une des forces les plus précieuses que la nature puisse nous offrir.

Avant de connaître le pouvoir magnétique du courant électrique, un grand nombre de savants avaient déjà émis l'idée d'appliquer à la télégraphie la faculté que possède l'électricité de se propager instantanément d'une extrémité à l'autre d'un conducteur isolé. Un savant écossais, dont le nom n'est connu que par les initiales G. M., George-Louis Lesage, à Genève, avaient chacun de leur côté imaginé des systèmes télégraphiques qui devaient fonctionner au moyen d'une machine électrique. Mais les inconvénients qui résultent de ce mode de production d'électricité toujours plus ou moins incertain, la complication des moyens proposés, rendirent infructueux les essais nombreux qui furent tentés de 1787 à 1813. Cependant Soemme-

ring, en 1811, avait imaginé la construction d'un télégraphe fondé sur la propriété du courant voltaïque de décomposer l'eau, mais le nombre considérable de circuits électriques qu'exigeait un pareil système, puisqu'il en fallait autant que de signes, le rendait peu praticable; de plus, les indications exigeaient un certain temps pour se manifester. Ce dernier inconvénient était évité dans le système proposé par Ampère, en 1820, après la découverte d'Oersted, qui consistait à faire usage de l'action instantanée que le courant exerce sur l'aiguille aimantée; mais le premier inconvénient, celui du nombre considérable de circuits nécessaires, subsistait toujours. Toutefois MM. Ritchie et Alexander construisirent à Édimbourg, en 1837, un télégraphe qui était la réalisation du système d'Ampère; seulement en supposant qu'il leur fallait 24 signes, au lieu de 48 conducteurs ils n'en établissaient que 25, un seul étant suffisant pour le retour des courants transmis par les 24 autres. Fechner avait proposé pour rendre l'effet plus sensible sans avoir besoin d'augmenter outre mesure la force de la pile, de se servir du galvanomètre multiplicateur et d'en avoir autant que de signes à transmettre; du reste il avait bien entrevu toute la portée de ce mode de communication.

Shelling eut le premier l'heureuse idée qu'il n'était pas indispensable d'avoir autant de conducteurs que de signes et il montra qu'avec un seul multiplicateur on pouvait transmettre un grand nombre de signaux, en combinant convenablement les déviations de l'aiguille aimantée qui pouvaient avoir lieu tantôt à droite, tantôt à gauche, de manière qu'une déviation à gauche, une déviation à droite, 2 déviations de suite à gauche, 2 à droite, 2 déviations de suite mais la première à gauche, la seconde à droite, 2 encore de suite, mais la première à droite, la seconde à gauche, etc., etc., représentaient des signes conventionnels. Pour éviter que l'aiguille fût par trop fortement ébranlée par ces brusques déviations, Shelling y fixa un petit appendice qui en plongeant dans un godet de mercure amortissait les ébranlements qu'aurait éprouvés l'aiguille. Il joignit également une espèce de réveil à son appareil afin que l'oreille fût avertie du commencement de l'observation; à cet effet, les