

QU'EST-CE QUE LE COURANT ELECTRIQUE ?

L'ELECTRICITE

RENCONTRE

LE MAGNETISME

TOUT ce que nous avons dit sur l'électricité aurait pu être écrit avant 1830. On connaissait, en effet, la pile depuis 1800 et les lois du courant continu avaient été étudiées. On connaissait, d'autre part, le magnétisme, étudié à partir des aimants naturels, ces pierres dites « magnétites » qui attiraient les morceaux de fer. On avait même utilisé ce magnétisme, depuis longtemps pour guider les navires, grâce à la boussole.

Mais, jusqu'à l'année 1830, on avait considéré l'électricité et le magnétisme comme deux domaines parfaitement séparés, sans aucun rapport entre eux.

Il a fallu qu'un physicien danois, Christian Oersted, à l'âge de cinquante-trois ans, fasse en 1830 la célèbre expérience qui porte son nom pour que l'on commence à prendre conscience de l'interpénétration de l'électricité et du magnétisme. C'est d'ailleurs cette même année que la quasi-totalité des lois de l'électromagnétisme fut mise sous forme claire grâce au génie d'André-Marie Ampère.

L'EXPERIENCE D'OERSTED

Il est très facile de refaire cette expérience, et nous le conseillons beaucoup aux lecteurs, pour qu'ils se rendent bien compte que les bases de l'électromagnétisme correspondent à des lois simples, faciles à vérifier expérimentalement.

Prenez donc une simple boussole, par exemple celle qui figure sur certains porte-clefs et placez-la sur une table, si possible loin de tout aimant : la partie bleue de l'aiguille indique le Nord.

Posez dessus (fig. 1) un fil électrique quelconque, de préférence souple, que l'on immobilise de part et d'autre de la boussole par des objets lourds, le fil étant bien parallèle à la position de repos de l'aiguille aimantée.

Au moyen d'une pile, faites passer du courant dans le fil (en procédant comme sur la figure, on met la pile en court-circuit, ce qui n'est pas très sain, il faut alors limiter à un temps très court le passage du courant).

On constate immédiatement que l'aiguille dévie, se mettant presque en croix avec le fil. On constate aussi que, si le courant passe (au sens conventionnel du mot, depuis le pôle positif de la pile, soit la petite lame, vers le pôle négatif, soit la grande lame ou l'enveloppe dans le cas d'une pile torche de 1,5 V, qui convient parfaitement) en allant depuis le pôle sud vers le pôle nord de l'ai-

guille (la partie bleue), ce pôle nord dévie vers la gauche pour un observateur que l'on suppose couché au-dessus de la boussole, le long du fil, le courant lui entrant par les pieds et sortant par la tête, en supposant le fil au-dessus de la boussole.

On peut refaire l'essai en limitant le courant à une valeur assez faible, par exemple à 0,1 A (avec une résistance de 47Ω pour une pile de 4,5 V, ou de 15Ω pour une pile de 1,5 V, la résistance étant insérée dans le circuit, en série avec le fil). On voit que la déviation finale est d'autant plus petite que le courant passant dans le fil est plus petit. On peut enfin refaire l'essai en plaçant le fil au-dessous de la boussole et non au-dessus : la déviation de l'aiguille se fait en sens inverse. Cette déviation s'inverse aussi quand on inverse le sens du passage du courant dans le fil.

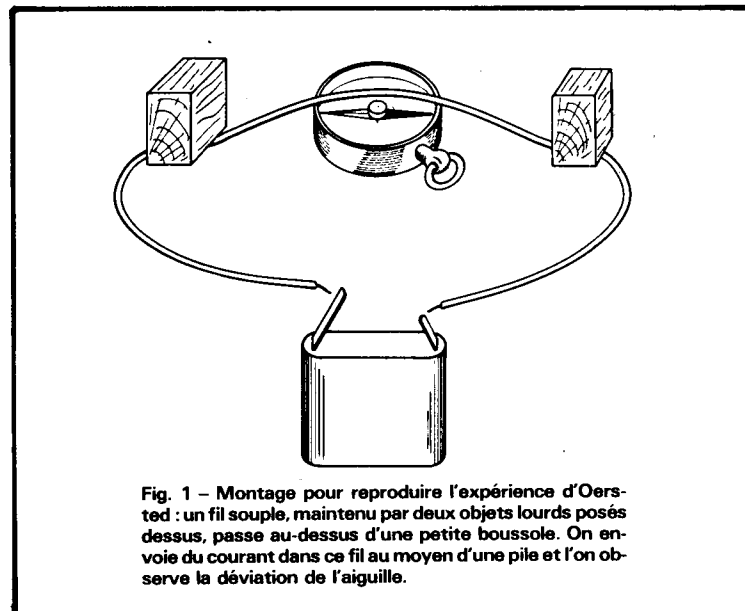


Fig. 1 - Montage pour reproduire l'expérience d'Oersted : un fil souple, maintenu par deux objets lourds posés dessus, passe au-dessus d'une petite boussole. On envoie du courant dans ce fil au moyen d'une pile et l'on observe la déviation de l'aiguille.

Toujours en limitant l'intensité du courant à une valeur assez faible, par exemple moins de 0,1 A, que la pile peut support longtemps, on peut faire d'autres essais.

Il est d'abord possible de faire passer le fil en dessus de la boussole dans un sens et de le faire revenir en dessous dans le sens opposé. On constate alors que, pour une même intensité, la déviation de l'aiguille est plus forte que si le fil passait simplement en dessus (ou en dessous).

Si l'on bobine le fil autour de la boussole, en faisant un bobinage très plat, ramassé comme en une spire unique (il vaut mieux prendre du fil émaillé de diamètre assez petit, par exemple 0,2 mm ou moins pour cet essai), on augmente encore beaucoup la sensibilité de l'aiguille au courant. Avec un bobinage de 50 spires, par exemple, on obtient une sensibilité 100 fois plus grande qu'avec un fil unique. Il devient alors possible de détecter des intensités de quelques milliampères.

QUE DEDUIRE DE TOUT CELA ?

Tous les essais que nous venons de faire nous montrent que le courant électrique engendre autour de lui un champ magnétique, et que ce champ est renforcé si l'on fait passer le courant dans une bobine.

Ce dernier point nous permet aussi de nous rendre compte des propriétés du fer doux, capable de multiplier le champ magnétique, en « concentrant en lui les lignes de force » du champ. Pour le voir, rien de plus simple.

On commence par confectionner un tube en carton, en roulant

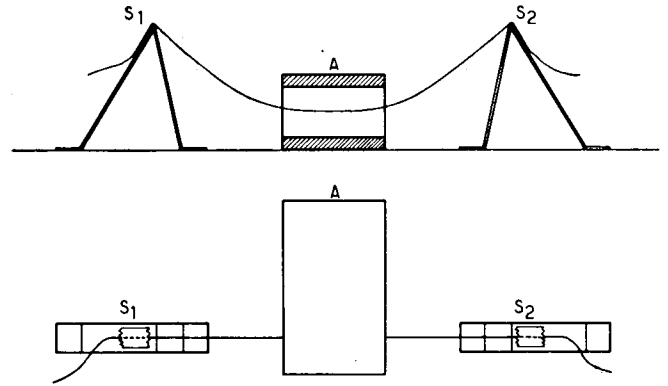
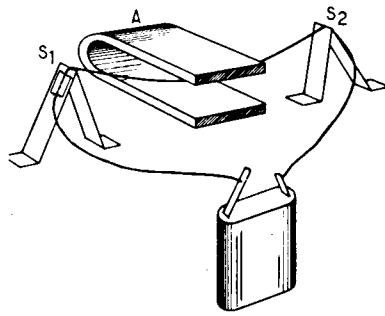
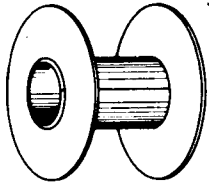


Fig. 2 - Carcasse de bobine formée d'un tube en carton roulé, avec deux joues en carton collées pour réaliser un bobinage permettant de voir le fonctionnement d'un électro-aimant.

Fig. 3 - Montage permettant de mettre en évidence l'action des aimants sur les courants. Le fil souple est maintenu par deux rubans adhésifs sur des supports en carton, S1 et S2; il passe dans l'entrefer d'un aimant.

Fig. 4 - Vue en plan et en élévation des supports et de l'aimant de la figure 3.

une feuille de bristol que l'on colle sur elle-même, d'un diamètre intérieur de l'ordre du centimètre et d'une longueur de 2 ou 3 cm. On munit ce tube, aux deux extrémités, de deux rondelles de carton collées d'un diamètre extérieur de 4 cm (fig. 2). On peut, une fois la colle bien sèche, bobiner sur ce tube du fil émaillé de 20/100 (diamètre 0,2 mm) ou de 30/100. Pour cela, on fait passer le fil par un petit trou voisin du tube de carton, percé dans une des joues, on monte la bobine sur une sorte de mandrin qui permette de la faire tourner au moyen d'une chignolle serrée dans un étau, puis on tourne en essayant de penser à autre chose, parce que c'est assez ennuyeux de faire des bobinages.

On peut facilement faire 2 000 spires de fil de 30/100 (cela fera une résistance totale d'une quarantaine d'ohms) ou 4 500 spires de fil de 20/100, ce qui représente à peu près deux cents ohms. Le bobinage en fil fin nécessite environ 350 m de fil, en 30/100, il faut à peu près 170 m.

Avec une telle bobine, on peut utiliser une pile de 4,5 V directement dans le cas du fil de 30/100 (le plus recommandé) ou deux piles de ce type en série pour le bobinage en 20/100.

On voit que, dès que le courant passe, on peut attirer (assez faiblement) des petits clous au voisinage de la bobine. Mais, si l'on a logé dans la bobine une tige de fer doux de 6 à 8 mm de diamètre, on arrive à produire, lorsque le courant passe dans le fil, un champ magnétique beaucoup plus puissant, attirant à une bonne distance des pièces de fer dès que le circuit est établi avec la pile. Nous

avons constitué un électro-aimant, dont l'emploi est si généralisé, des relais aux commandes d'ouverture de porte, en passant par les sonnettes, les électro-aimants de levage dans les aciéries et les écouteurs téléphoniques.

Nous verrons plus loin beaucoup d'autres emplois des bobines, c'est la raison pour laquelle nous conseillons aux lecteurs de ne pas débobiner celle qu'ils viennent de réaliser : elle leur servira pour de nombreux autres essais ultérieurs.

QUI DIT ACTION DIT REACTION

Les premiers expérimentateurs de l'électro-magnétisme ont tout de suite pensé que, si un fil immobilisé agit sur une aiguille aimantée en tendant à la faire tourner, cela doit être réciproque : une aiguille aimantée fixe doit agir sur un fil mobile où du courant peut passer, en tendant à le faire se déplacer.

L'expérience est facile à faire, mais, pour bien mettre cette action en évidence, nous n'utiliserons pas le champ magnétique, insignifiant, produit par une simple aiguille aimantée : nous ferons appel à celui d'un bon aimant, bien plus énergétique.

Pour que l'expérience soit bien nette, il est recommandé de procéder comme suit :

On place sur une planche un aimant A, une branche au contact de la table, l'autre branche au-dessus de la première (fig. 3). Sur cette même planche, on dispose deux supports S₁ et S₂, en bandes de carton, pliées en forme de V la

pointe en haut, ayant chacune deux petites pattes repliées, collées sur la planche ou fixées sur elle par des agrafes.

Un fil relativement souple F est fixé le long des pentes extérieures des supports par du ruban adhésif, le tout étant disposé de telle sorte que le fil ait un peu de mou dans la zone entre les supports et qu'il passe bien entre les deux branches de l'aimant, à mi-hauteur, vers le bout des branches, là où le champ est le plus fort. La figure 4 montre mieux la disposition des supports du fil et de l'aimant, dans une vue de face et de dessus.

On fait alors passer du courant dans le fil au moyen d'une pile, de préférence en limitant l'intensité à moins de 0,2 A par une résistance en série avec le fil (7 Ω pour une pile torche de 1,5 V, 22 Ω pour une pile plate de 4,5 V).

On constate immédiatement que le fil est poussé dans une direction, exemple vers le point de l'aimant où les branches se rejoignent, ou dans l'autre suivant le sens du courant. La force qui agit sur le fil est, on le voit, perpendiculaire au fil et au champ magnétique (ici, ce dernier est vertical, allant d'une branche de l'aimant droit vers l'autre).

Nous venons de mettre en évidence l'action des aimants sur les courants, phénomène fondamental dont les applications sont si importantes que nous n'arriverions pas à en dresser ici une liste même partielle sans consommer un nombre de pages déraisonnables du haut-parleur (citons, juste pour mémoire... les hauts-parleurs, précisément, avec les moteurs électriques, les galvanomètres, etc.).

Une étude plus approfondie du phénomène montre que l'action est toujours perpendiculaire au champ et au courant, qu'elle est maximale quand le champ magnétique est perpendiculaire lui-même au courant, qu'elle est nulle là où le fil est parallèle au champ.

DU FIL BOBINÉ SUR UN CADRE

Notre but n'est pas de faire une étude générale des applications des forces exercées par les aimants sur les courants. Nous nous bornerons à ce qui nous semble le plus important pour un électronicien : le galvanomètre à cadre mobile.

Pour bien voir comment il fonctionne, le mieux est de faire une série d'expériences simples que nous allons décrire ci-après.

On commence par reprendre le dispositif des expériences des figures 3 et 4. On place le fil souple en une sorte de U comme l'indique la figure 5, un des côtés du U ayant un peu plus de mou que l'autre, pour que les deux brins de fil soient au-dessus l'un de l'autre mais non confondus.

Si l'on envoie du courant dans le fil, on voit un des brins dévier dans un sens et l'autre brin dans le sens opposé. Ceci est tout à fait en accord avec les essais précédents : le courant « va » dans un fil et « revient » par l'autre, donc les sens des forces sont opposés.

On prend alors un petit cadre en bois, par exemple de 32 x 53 mm en 1 cm de largeur (ces dimensions sont celles du tour en bois des tiroirs de boîtes d'allumettes, une fois que l'on a enlevé

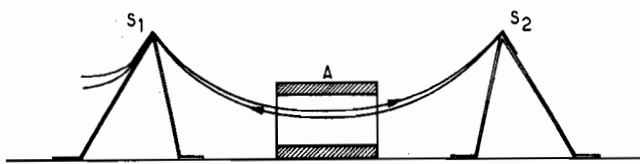


Fig. 5 - Maintenant, on fait passer deux fils dans l'aimant, un brin où le courant « va » et un autre par lequel il « revient ».

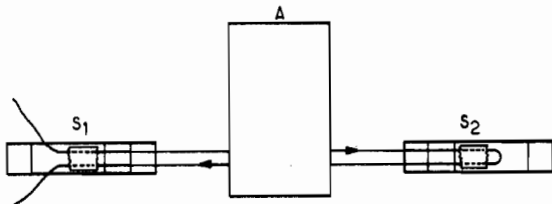


Fig. 6 - Sur un cadre en carton ou bois (pourtour du tiroir d'une boîte d'allumettes), on bobine plusieurs tours de fils pour constituer le cadre mobile d'un galvanomètre rudimentaire.

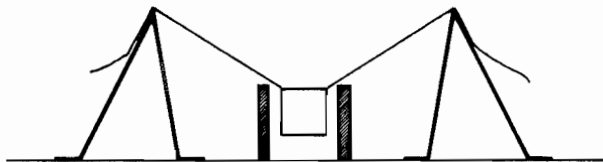


Fig. 7 - Le cadre est suspendu par ses fils, fixés à deux supports en carton, dans l'entrefer d'un aimant.

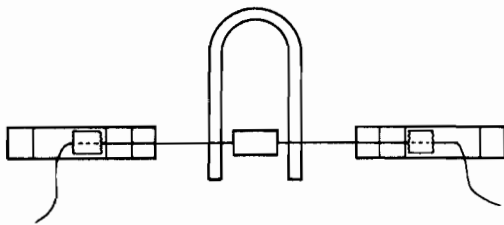


Fig. 8 - Structure d'un galvanomètre à cadre mobile classique : l'aimant envoie son champ magnétique par les pièces polaires P1 et P2, le champ se referme par la pièce cylindrique P3 et le cadre, ramené à sa position par le ressort spiral S, passe dans l'entrefer. Ce cadre est muni d'une aiguille A.

le fond). A défaut d'un tel cadre tout fait, on peut facilement en réaliser un par collage d'une bande en carton, mais le bois est préférable par sa légèreté et sa solidité.

Sur ce cadre, on enroule du fil émaillé de 15/100. On débute l'enroulement sur l'arête A du cadre (fig. 6) en fixant le fil par une goutte de colle du genre cellulosique (colle Scotch, Limpidol ou analogue). Il faut laisser dépasser un bout de fil avant de commencer le bobinage, ce bout ayant au moins 40 cm.

L'enroulement est fait en 100 ou 200 tours, assez groupés et se termine sur l'arête B, avec arrêt par une goutte de colle. Après enroulement, on laisse dépasser le second bout d'environ 40 cm aussi.

On monte alors le cadre comme l'indique la figure 7, suspendu par ses deux fils à deux supports en carton plié, sur lesquels les fils du cadre sont fixés, du côté exté-

rieur des supports, par du ruban adhésif. Le cadre pend donc dans l'entrefer de l'aimant, et l'écartement des fils d'amener de courant (servant en même temps de fils de suspension) fait qu'il est ramené à sa position stable (celle qui est représentée sur la figure) par un couple qui croît quand on l'écarte de cette position en le faisant tourner sur lui-même.

On peut alors constater que, en envoyant dans le cadre, par les fils (dénudés aux extrémités, bien entendu), un petit courant, le cadre se met à tourner d'un certain angle par rapport à sa position initiale. Nous avons réalisé un galvanomètre à cadre mobile. Ce mouvement de rotation est logique : sur tous les fils du cadre où le courant « monte » (de bas en haut), la force due à l'aimant est, par exemple, dirigée vers l'avant, alors que sur tous les fils où le courant « descend », la force résultant de l'action du champ est dirigée vers l'arrière. Le cadre est

bien soumis à un couple (« envie de tourner ») qui le fait tourner jusqu'à ce que le couple de rappel dû aux fils équilibre le couple d'origine électro-magnétique.

Le « vrai » galvanomètre à cadre mobile diffère un peu de ce que nous venons de réaliser. D'abord, le cadre est mobile autour d'un axe (ce qui l'empêche de se balancer bêtement d'arrière en avant). Ensuite, pour le ramener à sa position d'équilibre, on n'utilise pas l'action de la pesanteur sur deux fils divergents, mais un ressort spiral (ou deux spiraux, comme on le verra).

Enfin, et c'est là un point très important, on renforce énormément le champ magnétique au voisinage du cadre par des « pièces polaires », qui canalisent ce champ et en augmentent beaucoup la force et la régularité.

Un galvanomètre de réalisation courante se présente donc comme l'indique la figure 8. L'aimant est muni de deux pièces polaires

P1 et P2, évidées pour laisser tourner le cadre C. En plus de ces pièces, il y a un noyau, la pièce P3, autour de laquelle tourne le cadre. Avec cette disposition des trois pièces polaires, le champ magnétique est très intense, et, dans l'entrefer, il est presque partout perpendiculaire à la direction de l'entrefer, ce qui est très avantageux pour la force électro-magnétique sur les fils du cadre.

Le cadre lui-même, mobile autour d'un axe, est ramené à sa position de repos par un spiral S ; il porte une aiguille A qui permet de voir la rotation.

En réalité, dans la plupart des galvanomètres, le cadre est ramené à sa position de repos par deux spiraux, chacun servant de connexion depuis la partie fixe vers les fils du cadre. Le courant arrive dans le cadre par un des spiraux et en repart par l'autre. Enfin, en plus de ce que nous avons représenté, il y a, sur le cadre, des masselottes d'équilibrage pour faire en sorte que le centre de gravité de l'ensemble cadre-aiguilles-masselottes soit exactement sur l'axe du cadre : ainsi, la position de ce cadre par rapport à la partie fixe n'est pas influencée par la position de l'ensemble par rapport à la verticale.

Il y a beaucoup de variations possibles dans la structure du galvanomètre ; on rencontre souvent, par exemple, des aimants bien plus petits que celui qui est représenté sur la figure 8. On loge même souvent l'aimant à la place de la pièce centrale P3, il a un pôle nord à droite, par exemple, un pôle sud à gauche, et les pièces P1 et P2 sont remplacées par un cylindre creux de fer doux, dans lequel les lignes de force de l'aimant central se referment.

Signalons aussi les modèles « 270° » dans lesquels la rotation du cadre n'est pas limitée à 90° ou à 100° (cette limitation provient de la forme des pièces polaires P1 et P2). Le cadre tourne alors autour d'un axe qui n'est pas son axe de symétrie, mais qui passe par un des grands côtés du cadre. Cet axe est situé au centre d'une pièce polaire en forme de cylindre avec un trou axial, reliée à un pôle de l'aimant, alors que l'autre pôle est relié à une autre pièce polaire qui enveloppe presque complètement le cylindre en question (fig. 9). Il faut toutefois noter que certains modèles « 270° » sont réalisés avec un cadre classique et une multiplication mécanique du mouvement de l'aiguille.

QUELLE EST LA SENSIBILITE OBTENUE ?

Dans un galvanomètre à cadre mobile, du type de la figure 8, on obtient la déviation totale (un peu inférieure à la rotation maximale que permet le mécanisme) pour une intensité donnée, appelée intensité nominale.

Si cette intensité est inférieure à 1 A et supérieure à 1 mA, on nomme le galvanomètre un « milliampèremètre ». Si elle est inférieure 1 mA, on dit qu'il s'agit d'un microampèremètre.

En général, pour un cadre normal, il est rare qu'il faille plus de 50 mA pour faire dévier le cadre à fond (cela correspond à peu de tours d'un fil assez gros et à des spiraux assez « raides »). D'autre part, il est difficile de faire en sorte que le cadre dévie à fond pour moins de 5 μ A (il s'agit d'un cadre bobiné en fil très fin — près de 4/100 — et de spiraux à couple de rappel très faible). On arrive cependant à des galvanomètres utilisables et d'une robustesse correcte avec une sensibilité nominale de 1 μ A. Le plus souvent, un galvanomètre à cadre a une intensité nominale comprise entre 50 μ A et 10 mA.

Nous citerons toutefois ici les modèles spéciaux de laboratoire. Ils utilisent un cadre ramené à sa position non par un spiral mais par un long fil de torsion. A la place de l'aiguille, ils utilisent un rayon réfléchi par un petit miroir solidaire du cadre (on y gagne, car, pour une rotation d'un certain angle du cadre, le rayon réfléchi tourne d'un angle double). Avec des aimants très forts, des cadres en fils ultra-fins, on arrive ainsi à des appareils qui permet-

tent de déceler le nanoampère (un millième de microampère). Mais, en général, tels appareils ne sont guère transportables ; ils exigent un temps de lecture très long et ne peuvent s'employer que dans des conditions assez difficiles à réaliser.

Pour les modèles classiques à aiguille, on prévoit généralement la force de l'aimant et le nombre de tours du cadre de telle sorte que la déviation totale soit obtenue, au départ, pour une intensité un peu inférieure à l'intensité nominale. On réduit alors la sensibilité du galvanomètre au moyen d'un « shunt magnétique », pièce en fer doux, que l'on peut ajuster, et qui fait passer une partie du champ magnétique de l'aimant directement de P₁ à P₂, sans passer par les entrefers. On arrive ainsi à obtenir une déviation donnée pour une intensité choisie à l'avance.

Suivant la « classe » de l'appareil (c'est-à-dire suivant le degré de précision garanti), on procède à la graduation du cadran d'après un modèle fait à l'avance (en espérant que tous les appareils de la même série ont la même loi de rotation du cadre en fonction de l'intensité), ou l'on repère sur le cadran les points correspondants aux différentes intensités qui sont, par exemple de 0,1, 0,2, 0,3... 0,8 et 0,9 fois l'intensité nominale : on fait alors une graduation « sur mesures », ce qui est plus précis.

COMMENT REDUIRE LA SENSIBILITE D'UN GALVANOMETRE

Une fois en possession d'un galvanomètre donné, on ne peut augmenter sa sensibilité (c'est-à-

dire réduire l'intensité nominale), à moins de faire appel à un système électronique amplificateur de courant.

En revanche, il est très facile de réduire sa sensibilité, et cela peut être indispensable, si l'on doit mesurer une intensité supérieure à l'intensité nominale.

Prenons tout de suite un exemple numérique. Soit un galvanomètre dont la sensibilité nominale est de 100 μ A, à l'aide duquel nous voulons mesurer une intensité de 700 μ A environ. Nous avons donc besoin de réduire la sensibilité dans un rapport 10, par exemple.

Nous chercherons donc à faire passer 10 % du courant à mesurer dans le cadre du galvanomètre et 90 % de ce courant par une autre voie.

Nous y arriverons très bien grâce aux ressources de la loi d'Ohm. Supposons que notre galvanomètre ait un cadre dont la résistance soit de 810 Ω , nous mettrons tout simplement (fig. 10) un résistor R de résistance 9 fois plus faible que celle du cadre (soit 90 Ω) en parallèle avec ce dernier. Comme il y aura la même tension aux bornes du résistor R et du cadre, il passera dans le résistor une intensité 9 fois plus grande que dans le cadre. L'intensité dans le cadre sera de i , celle qui passe dans R sera 9 i , soit, en tout, pour le fil d'amener du courant :

$$I = i + 9i = 10i$$

Donc, grâce à la présence de R, il passera 10 % du courant à mesurer dans le cadre du galvanomètre et 90 % de ce courant dans R. Ce résistor R constitue une dérivation pour 90 % du courant total. Comme « dérivation » en anglais se dit « shunt », nous appellerons « shunt » ce résistor

qui, mis en parallèle avec le galvanomètre, réduit sa sensibilité dans un rapport donné.

L'ensemble du galvanomètre et du shunt de 90 Ω constitue l'équivalent d'un appareil de mesure ayant une intensité nominale de 1 mA (dix fois celle du galvanomètre proprement dit).

On voit donc qu'un « shunt au dixième » (réduisant au dixième la sensibilité de l'ensemble) est neuf fois moins résistant que le cadre. De même, un shunt au centième aurait une résistance 99 fois plus faible que celle du cadre (ici, on prendrait donc un shunt de 8,18 Ω et le tout donnerait un appareil déviant à fond pour 100 x 100 μ A, soit 10 mA). D'une façon générale, un shunt au n^{ème} (réduisant la sensibilité dans le rapport n) a une résistance (n - 1) fois plus petite que celle du cadre.

Donc, la qualité essentielle d'un galvanomètre à cadre doit être une bonne sensibilité (une intensité nominale aussi faible que possible, dans la mesure où cela est compatible avec des impératifs de prix, de solidité et de stabilité dans le temps). On pourra toujours, avec l'aide des shunts, ramener la sensibilité à une valeur voulue.

Une autre qualité d'un tel appareil sera aussi d'avoir une résistance de cadre aussi réduite que possible. Comme on doit faire passer dans le cadre le courant à mesurer (ou une fraction connue de ce courant dans le cas de l'emploi d'un shunt), il faut que l'appareil « gêne » le moins possible ce passage, donc qu'il ait une résistance aussi faible que possible.

On pourra tolérer une résistance de cadre plus importante, toutes choses égales par ailleurs, si le cadre a une intensité nominale très réduite. Une résistance de ca-

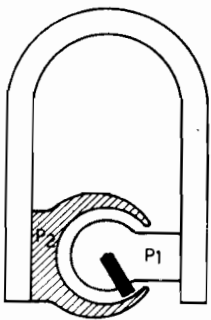


Fig. 9 - Structure du galvanomètre dit « 270° », dans lequel le cadre pivote autour d'un de ses côtés, situé au centre, la pièce polaire centrale P1, l'autre pièce polaire, P2, enveloppant presque complètement la première.

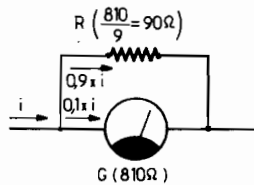


Fig. 10 - Si l'on met en parallèle avec un galvanomètre G un résistor R dont la résistance soit neuf fois plus petite que celle de G, il passera neuf fois plus de courant dans R que dans G, soit 10 % du courant total dans G et 90 % dans R, que l'on appelle un « shunt » et qui permet de multiplier l'intensité nominale de l'ensemble par dix.

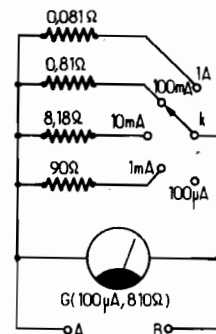


Fig. 11 - Avec un jeu de shunts différents, commutés par un contacteur K, on réalise un galvanomètre à plusieurs sensibilités (sur la première échelle, soit 100 μ A, le galvanomètre n'est pas shunté).

dre de 810Ω pour un microampèremètre de $100 \mu\text{A}$ d'intensité nominale est relativement peu gênante, mais, si le cadre avait une intensité nominale de 10 mA , il serait souhaitable que sa résistance ne dépasse guère huit ou dix ohms.

On chiffre souvent la qualité d'un tel appareil en donnant la tension que l'on trouve aux bornes du cadre quand il passe dans ce dernier l'intensité nominale. Dans le cas de notre exemple ($100 \mu\text{A}$ 810Ω) on a, aux bornes du cadre pour une intensité de $100 \mu\text{A}$, une tension de :

$$810 \times 100 \times 10^{-6} = 0,081 \text{ V} \\ (81 \text{ mV})$$

Suivant les qualités des galvanomètres à cadre, pour des intensités nominales usuelles (de $100 \mu\text{A}$ à 5 mA), on trouve une « chute de tension » allant de 30 mV (appareils excellents) à 1 V (appareils de qualité douteuse, à réserver pour des mesures d'intensité sur des circuits alimentés par des tensions relativement importantes, où une tension parasite de 1 V ne gêne pas).

UN CADRE, PLUSIEURS SHUNTS : PLUSIEURS SENSIBILITES

Pour un même galvanomètre, on peut envisager de commuter plusieurs shunts et l'on aura ainsi un appareil assez universel, puisque l'on peut en ajuster la sensibilité en fonction de la valeur de l'intensité à mesurer.

En reprenant toujours notre exemple du galvanomètre de $100 \mu\text{A}$ dont la résistance de cadre vaut 810Ω , nous avons vu que, avec un shunt de 90Ω , on en fait un milliampèremètre, déviation totale pour 1 mA .

Avec un shunt de $810/99 = 8,18 \Omega$, on obtient un appareil allant à fond pour 10 mA . Il faut un

shunt de $0,81 \Omega$ pour arriver à l'appareil qui a une déviation totale pour 100 mA . Enfin, si la résistance du shunt vaut $0,081 \Omega$, le tout donne un ampèremètre qui dévie à fond pour 1 A (pour les shunts au millième et au dix-millième, nous n'avons plus pris des résistances 999 ou 9999 fois plus faibles que celle du cadre, la précision de réalisation ne permet pas d'aller aussi loin dans les décimales, nous avons donc pris des shunts ayant une résistance 1000 fois ou 10 000 fois plus petite que celle du cadre).

On pourra munir l'appareil d'un ensemble de shunts, avec un commutateur qui branche l'un d'entre eux en parallèle sur le cadre du galvanomètre, ainsi que l'indique la figure 11. On voit sur cette figure que l'une des positions du commutateur ne correspond à aucun shunt branché en parallèle : l'échelle correspondante est donc de $100 \mu\text{A}$.

Signalons toutefois, pour être précis, que l'on fait rarement la commutation comme l'indique la figure 11. Cette solution, bonne pour les shunts de $9,18 \Omega$ ou 90Ω , ne serait pas très indiquée pour le shunt de $0,81 \Omega$ et désastreuse pour le shunt de $0,081 \Omega$: il faudrait que le commutateur soit vraiment une merveille pour que la résistance de contact qu'il introduit en série soit négligeable par rapport à $0,081 \Omega$. Si, par exemple, cette résistance de contact varie entre zéro et $0,01 \Omega$ (ce qui n'est déjà pas si mal), on va fausser l'échelle 1 A dans un rapport de $0,081$ à $0,091$, soit de plus de 10% . Rappelons que la résistance de contact d'un commutateur varie d'une manœuvre à l'autre de façon totalement erratique et imprévisible. On réalise donc la commutation des shunts suivant un schéma plus compliqué, conduisant à des valeurs de résistances nettement plus difficile à calculer, mais éliminant l'influen-

ce de la résistance de contact sur la sensibilité de l'ensemble.

MESURONS LES TENSIONS

Le galvanomètre à cadre nous permet donc de mesurer des intensités, avec une gamme considérable de valeurs pour un seul appareil, grâce aux shunts. Mais il y a une autre grandeur qu'il est essentiel de mesurer : la différence de potentiel entre deux points (tension).

Une des méthodes les plus courantes pour réaliser cette mesure est la suivante :

On veut connaître la différence de potentiel $u = V_A - V_B$ entre deux points A et B ; on le fera en reliant ces points par un résistor de résistance R et en mesurant, par un galvanomètre G, le courant i qui passe dans R sous l'influence de u . Il suffira de multiplier la valeur de cette intensité i par R pour avoir u , comme nous le dit la loi d'ohm (que ferait-on sans elle ?).

Le tout sera donc monté comme l'indique la figure 12.

Comme nous connaissons R, il est possible de graduer directement le galvanomètre G en volts. En face de la graduation i_0 , on porte la valeur

$$R \times i_0$$

Soit par exemple, un galvanomètre de sensibilité nominale $200 \mu\text{A}$ et un résistor R de $400 \text{ k}\Omega$: il y aura, en face de la graduation 200 (correspondant à $200 \mu\text{A}$) la graduation

$$200 \times 10^{-6} \times 400 \times 10^3 = 80 \\ (\text{soit } 80 \text{ V})$$

En général, dans un tel appareil, on ne met plus les graduations correspondant aux intensités, on ne trace que celles de tension. Dans le cas de notre exemple, on effacerait sur le cadran les graduations en microampères

pour ne tracer que les graduations en volts, de zéro à quatre-vingt.

C'est ainsi que l'on réalise un voltmètre.

VOLTMETRE A PLUSIEURS SENSIBILITES

Avec un même galvanomètre, si l'on modifie la valeur en ohms du résistor R, on change la sensibilité de l'appareil, ce qui lui permet, en employant plusieurs résistances et un commutateur, d'avoir plusieurs échelles.

Prenons toujours le cas de notre appareil à cadre de $200 \mu\text{A}$ d'intensité nominale. Nous pouvons souhaiter qu'il se transforme en un voltmètre qui dévie à fond pour 1 V . Or, pour qu'une tension de 1 V donne un courant de $200 \mu\text{A}$, soit 2.10^{-4} A , il faut que la résistance du circuit soit

$$1/2.10^{-4} = 5.10^3 \Omega \\ \text{soit } 5 \text{ k}\Omega$$

Il convient de préciser que la valeur de $5 000 \Omega$ doit correspondre à la résistance totale de l'appareil, soit celle du résistor R en série avec G, augmentée de celle de G. Supposons, pour fixer les idées, que la résistance interne du cadre de G soit de 300Ω (ce serait un appareil de 60 mV aux bornes pour la déviation totale, soit un très bon galvanomètre), il faudra mettre en série avec lui un résistor de :

$$5 000 - 300 = 4 700 \Omega$$

Si nous voulons une échelle qui corresponde à 5 V pour la déviation totale nous aurons à prévoir une résistance totale de $5/2.10^{-4} = 25 000 \Omega$, soit un résistor de $25 000 - 300 = 24 700 \Omega$ en série avec le galvanomètre.

Pour une échelle de 10 V , il faut un résistor total de $10/2.10^{-4}$, ce qui donne $50 000 \Omega$, soit un résistor de $49 700 \Omega$ en série avec le cadre.

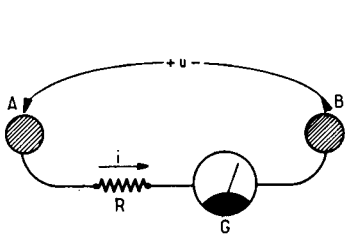


Fig. 12 - Pour mesurer la différence de potentiel u entre deux points A et B, on relie ces points par un résistor R et l'on mesure le courant i qui passe dans R sous l'influence de u : c'est ainsi que l'on constitue un voltmètre.

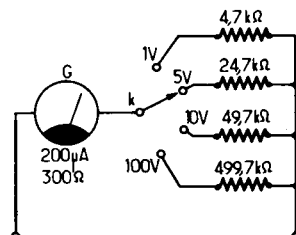


Fig. 13 - Avec plusieurs résistances différentes commutées en série avec G par un contacteur K, on réalise un voltmètre à plusieurs sensibilités. Ici, il s'agit d'un galvanomètre de $200 \mu\text{A}$, la résistance totale pour 1 V est $5 \text{ k}\Omega$, pour 5 V elle vaut $25 \text{ k}\Omega$: il s'agit d'un appareil dit de « 5 000 ohms par volt ».

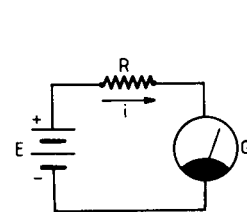


Fig. 14 - Il serait possible de mesurer la résistance de R en mesurant le courant i qui passe dans R sous l'influence de la tension E. Il s'agit d'une méthode peu utilisée (dangereuse pour le galvanomètre).

Si nous souhaitons maintenant que la déviation totale ait lieu pour une tension de 100 V, la résistance totale doit être de $100/2.10^{-4} = 500\ 000\ \Omega$, soit un résisteur de $499\ 700\ \Omega$ (ici, la correction de $300\ \Omega$ est à peine nécessaire, elle ne représente que 0,15 % de la résistance totale).

Un appareil à quatre sensibilités (1 V, 5 V, 10 V et 100 V) sera donc réalisé comme le montre la figure 13.

On voit que la résistance totale de notre voltmètre, pour une échelle correspondant à une déviation à fond pour N volts est de :

$$N/2.10^{-4}$$

Il revient au même de diviser la valeur N par 2.10^{-4} ou de multiplier N par l'inverse de 2.10^{-4} soit $1/2.10^{-4}$, soit 5 000.

COMMENT CHIFFRER LA QUALITÉ D'UN VOLTMÈTRE ?

Nous avons demandé à l'ampèremètre de perturber aussi peu que possible la grandeur qu'il était chargé de mesurer. Comme il est parcouru par le courant dont on veut connaître l'intensité, il faut qu'il ait une résistance interne aussi faible que possible.

Pour le voltmètre, ce sera juste le contraire. Comme il effectue la mesure d'une différence de potentiel en consommant un certain courant, inférieur ou égal à l'intensité nominale du galvanomètre dont il est constitué, on va lui demander de perturber aussi peu que possible cette différence de potentiel. Or, en consommant du courant, il la perturbe car toute source a, comme on l'a vu, une certaine résistance interne.

On va donc tout faire pour que cette consommation soit aussi faible que possible. On choisira donc un galvanomètre très sensible pour réaliser un voltmètre, mais on sera limité dans ce choix par des considérations de possibilités techniques, de prix, de solidité.

On pourrait donc chiffrer la qualité d'un voltmètre en disant « Appareil qui consomme moins de $200\ \mu\text{A}$ » (dans le cas de l'exemple de la figure 13), ou « Appareil qui consomme moins de 1 mA », si telle est l'intensité nominale du galvanomètre qui nous a servi à réaliser le voltmètre.

Plus cette consommation est faible, meilleur est l'appareil.

Seulement, cette façon de définir la qualité du voltmètre n'est pas celle que l'on emploie couramment. On préfère chiffrer la qualité d'un appareil par une grandeur d'autant plus élevée que la qualité est meilleure. On ne prendra donc pas l'intensité maximale consommée, maison inverse. Nous avons vu plus haut que l'inverse de 2.10^{-4} (dans le cas d'un galvanomètre de $200\ \mu\text{A}$) est 5 000. C'est précisément la valeur par laquelle il faut multiplier la tension correspondant à la déviation totale pour avoir la résistance totale : pour une échelle de 10 V, on trouve $10 \times 5\ 000 = 50\ 000\ \Omega$, pour 1 V on trouve $5\ 000\ \Omega$.

C'est pourquoi on dit que l'appareil en question a une résistance de 5 000 « ohms par volt », en sous-entendant bien que le mot « volt » se rapporte bien à la tension pour la déviation totale.

Donc, quand un voltmètre à plusieurs sensibilités, ayant, par exemple, $10\ \text{k}\Omega/\text{V}$, est mis sur une sensibilité de 30 V, sa résistance est de :

$$30 \times 10\ 000 = 300\ 000\ \Omega$$

Insistons bien sur ce point. Si l'on vous posait la question « Un voltmètre de $5\ 000\ \Omega/\text{V}$ indique 7 V, quelle est sa résistance ? » Il faudrait que vous ayez le courage de répondre : « La question est idiote. La valeur lue ne compte pas pour connaître la résistance, puisque celle-ci ne change pas, bien entendu, quand l'aiguille se déplace. Seule la valeur de l'échelle de mesure compte. Si le voltmètre indique 7 V, cela signifie uniquement qu'on l'utilise sur une échelle correspondant à une déviation totale pour plus de 7 V ».

C'est la raison pour laquelle il nous a toujours semblé un peu insuffisant de dire, à propos des valeurs lues aux différents points d'un montage et indiquées sur le schéma de ce dernier : « Tensions relevées avec un appareil de $20\ \text{k}\Omega/\text{V}$ ». En effet, un polymètre perturbe la valeur qu'il est chargé de mesurer, et il est important de savoir à quel point, et de relever les tensions, si possible, dans les mêmes conditions que chez le constructeur quand on dépanne. La connaissance de la résistance en ohms par volt du voltmètre utilisé par le constructeur pour relever les tensions normales ne suffit pas tout à fait pour être sûr que l'on opérera dans les mêmes conditions que le constructeur.

On peut parfaitement, par exemple, utiliser aussi un voltmètre

de $20\ \text{k}\Omega/\text{V}$ mais disposer, sur cet appareil d'une échelle de 10 V, de 30 V et 100 V, alors que l'appareil du constructeur ne comportait qu'une échelle 10 V et une échelle 100 V. Si l'on veut lire une tension voisine de 20 V, on utilisera, avec le voltmètre du constructeur, l'échelle 100 V (soit une résistance de $2\ \text{M}\Omega$ pour l'appareil), alors que celui qui dispose d'un voltmètre ayant une échelle 30 V utilisera cette dernière pour mesurer 20 V, et il aura alors un appareil dont la résistance est de $30 \times 20 = 600\ \text{k}\Omega$, qui peut perturber notablement plus la tension à mesurer que le voltmètre du constructeur ne l'avait fait.

LES VALEURS USUELLES

Les galvanomètres se sont beaucoup perfectionnés ces dernières années, surtout à partir des années 1950. Alors que, avant, un appareil de $1\ 000$ ou $2\ 000\ \Omega/\text{V}$ était courant (comportant un galvanomètre de 1 mA ou $500\ \mu\text{A}$), on a vite vu apparaître des modèles de 5 000, 10 000 et même $20\ 000\ \Omega/\text{V}$ (galvanomètres de 200, 100 puis $50\ \mu\text{A}$).

Les types de résistance plus grande sont restés relativement rares. Il y a des voltmètres de $40\ 000\ \Omega/\text{V}$ (galvanomètre de $25\ \mu\text{A}$) et quelques-uns de $100\ \text{k}\Omega/\text{V}$ (galvanomètre de $10\ \mu\text{A}$). Mais ils sont souvent assez chers et un peu fragiles. Signalons toutefois que l'on trouve des types de $1\ \text{M}\Omega/\text{V}$ (soit un galvanomètre de $1\ \mu\text{A}$). Mais, généralement, au-dessus de $40\ \text{k}\Omega/\text{V}$, il est avantageux de recourir à l'emploi d'un amplificateur électronique pour commander le cadre, on arrive à des appareils de très grande résistance interne qui utilisent cependant des galvanomètres de bonne robustesse.

Nous avons vu plus haut que, par un jeu de shunts, un galvanomètre peut devenir un ampèremètre à plusieurs sensibilités. Comme ce même galvanomètre, avec un autre jeu de résistances que l'on peut placer en série avec lui, peut se transformer en un voltmètre à plusieurs sensibilités, il est normal de rencontrer des appareils utilisant le même galvanomètre comme ampèremètre sur certaines positions d'un contacteur et comme voltmètre sur d'autres positions de ce même contacteur. On en imagine facilement le schéma.

Un tel appareil s'appelle alors

un « contrôleur universel » ou un « polymètre », et il rend de grands services.

LA MESURE DES RESISTANCES

Nous avons vu dans un autre article que l'utilisation du pont de Wheatstone permettait de mesurer des résistances.

Il y a un moyen moins précis mais très simple en utilisant un galvanomètre, une pile et des résistances de valeurs connues.

On pourrait penser à la méthode de la figure 14 : une pile de tension E connue est branchée aux bornes du résisteur R à mesurer, le galvanomètre G permet de mesurer l'intensité du courant I qui passe dans R, on calcule $R = E/I$.

Cela se fait, mais n'est pas recommandé. Si la valeur de R est tout à fait inconnue, il peut se faire que cette valeur soit très faible et que l'on branche ainsi une pile presque directement sur un ampèremètre, ce qui peut être très malsain pour l'ampèremètre, le courant débité par la pile pouvant être élevé.

On préfère mettre systématiquement en série avec la pile un résisteur r qui limite le courant maximal pouvant passer dans le tout si l'on court-circuite, par exemple, le résisteur R à mesurer.

On arrive alors au schéma de la figure 15. On y voit le résisteur interne r, et un résisteur ajustable T, servant, comme on le verra, pour le « tarage », pour ajuster la sensibilité de G à la valeur voulue.

Si nous commençons par court-circuiter les bornes A et B par un gros fil de cuivre de résistance négligeable (fig. 15 a), le courant qui passe dans r (et que G mesure, compte tenu du shunt T) est alors de

$$i = \frac{E}{r}$$

(nous négligeons la résistance du galvanomètre).

Branchons maintenant (fig. 15 b) le résisteur R entre les bornes A et B et supposons que la tension E de la pile n'ait pas changé. Le nouveau courant, i' , inférieur à i, vaut alors :

$$i' = \frac{E}{R + r}$$

Nous pourrions nous dispenser de connaître E si nous formons le rapport de i' et de i :

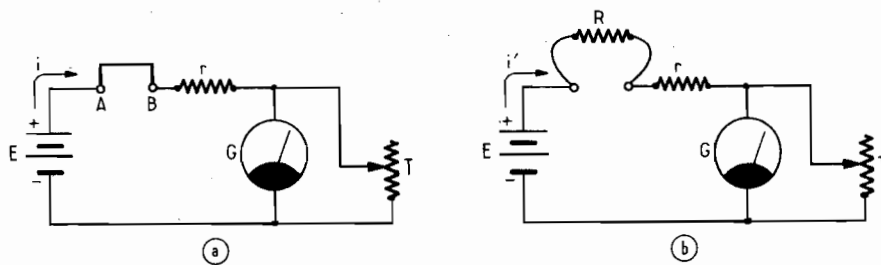


Fig. 15 - On préfère mesurer le courant qui passe dans le résistor R à mesurer en plaçant systématiquement en série avec lui un résistor r connu. Dans un premier temps (a), on court-circuite les bornes A et B et l'on ajuste le shunt de « tarage » T pour que le galv. anémètre dévie jusqu'à une graduation connue ; dans un second temps, sans retoucher le réglage de T, on met R entre A et B et on note la nouvelle position de l'aiguille, fonction seulement du rapport i'/i .

$$\frac{i'}{i} = \frac{r}{r+R} = \frac{1}{1+R/r}$$

Donc, le rapport i'/i ne dépend que du rapport de R et r, partant de 1 ($i' = i$) pour $R/r = 0$ (soit $R = 0$), passant par 0,5 pour $R/r = 1$ ($R = r$) et tendant vers zéro quand R/r tend vers l'infini.

Il est donc important de pouvoir mesurer i'/i . Pour cela, on fait en sorte que, lors du premier branchement (fig. 15 a), le galvanomètre dévie exactement à fond, ceci étant obtenu par ajustage de T. Donc, comme on n'a pas retouché à la valeur de T lors du second essai, la sensibilité de l'ensemble G - T n'a pas changé, et la déviation de l'aiguille lors du second essai est donc uniquement fonction de i'/i , puisque l'ensemble G - T, en raison de l'ajustage de T lors du premier essai, a une intensité nominale de i exactement, valeur que nous ne cher-

chons pas à connaître, mais qui sert de base pour la mesure de i' .

Donc, lors du second essai, l'aiguille va s'arrêter à un emplacement qui n'est fonction ni de i ni de i' mais uniquement de leur rapport i'/i . On peut donc mettre sous l'aiguille une graduation. On pourrait faire cette graduation en i'/i , mais il est plus commode de la faire en R/r .

Comme on connaît r, ayant lu R/r sous l'aiguille lors du second essai, on en déduit la valeur de R.

La méthode du tarage permet de faire les mesures avec une pile qui peut changer de tension au cours du temps. Evidemment, elle ne tient pas compte de la variation de résistance interne de la pile, mais on peut procéder en remplaçant la pile dès que l'on ne peut plus tarer sur l'échelle de résistance minimale : on évite alors un vieillissement tel que la résistance interne cesse d'être négligeable par rapport à r.

On rencontre aussi des ohmmètres (tel est le nom de cet instrument) qui comportent une pile au mercure, dont la tension reste invariable et la résistance interne faible jusqu'à la fin de vie de la pile (la tension s'effondre alors brusquement et la résistance interne remonte très vite). Dans ce cas, il n'est plus nécessaire de procéder au tarage, on se contente de vérifier que, en court-circuitant les deux fils, l'aiguille arrive bien sur la déviation la plus grande, en face de laquelle il y a le chiffre « zéro » sur l'échelle « résistances ».

Ce type d'ohmmètre accompagne souvent le voltmètre-ampèremètre dans les contrôleurs universels (qui sont aussi prévus pour les mesures en alternatif, mais nous verrons cela plus tard).

Une petite « colle » classique est la suivante : si l'on possède un tel ohmmètre, comment connaître la valeur du résistor interne r

pour une échelle donnée ? C'est bien facile : si l'on met à l'extérieur, le tarage fait, un résistor dont la résistance soit égale à r, le courant i' est moitié du courant i correspondant au tarage. Donc, en face de la position de l'aiguille correspondant à la moitié de la déviation totale (cette dernière correspond au zéro de l'échelle « résistance »), on lit directement la valeur du résistor interne r.

CONCLUONS

Comme on le voit, les trois quart de cet article ont été consacrés aux appareils de mesure à cadre mobile. Ce ne sont pas, tant s'en faut, les seules applications de l'électro-magnétisme, mais ce sont celles qui nous semblent les plus importantes pour quelqu'un qui débute dans la connaissance de l'électricité (ou qui rafraîchit ses notions), ce qui explique que nous leur ayons consacré tant de place.

Il nous reste maintenant à voir comment on peut mettre en évidence une propriété qui est peu « réciproque » des effets des électro-aimants, autrement dit comment, à partir d'un champ magnétique et d'une bobine, nous pouvons produire un courant. Cela nous amènera à parler de l'induction, mais... demain est encore un jour.

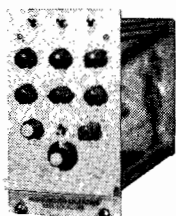
J.-P. OEHMICHEN
Ingénieur E.P.C.I.

tradelec

SPÉCIALISTE DU MATÉRIEL AUDIO PROFESSIONNEL

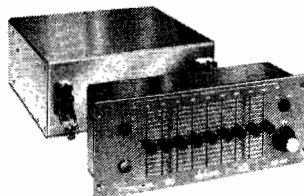
présente...

AUDIO & DESIGN



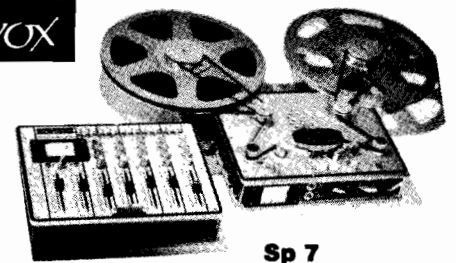
COMPRESSEURS
LIMITEURS
PHASING
ÉGALISSEURS
EXPANSEURS
Version :
Mono-Stéréo.

Astronic LTD



CORRECTEUR DE FREQUENCE A 1671 MK II
± 14 dB sur 9 bandes centrées de 50 à 10 250 Hz.

STELLAVOX



AMI

Console de mélange
mono-stéréo

Sp 7

mono, bi et tri - piste - 4 vitesses
3,3 kg, 21 x 27 x 8 cm

TRADELEC : 9, av. de la Porte-de-la-Plaine - 75015 Paris - Tél. 531.51.37