



THEORIE

COURS DE BASE
ELECTRONIQUE

MESURES ELECTRIQUES

Dans les leçons théoriques précédentes ont été introduites presque toutes les grandeurs électriques, avec leurs unités de mesure respectives, que l'on rencontre dans l'étude de l'électronique. Nous devons voir maintenant comment se mesurent ces grandeurs, c'est-à-dire comment, dans la pratique, on peut connaître leur valeur.

Dans ce but, précisons avant tout que, pour l'électronicien, il est essentiellement intéressant de mesurer le courant, la tension et la résistance. En effet, lorsqu'on connaît les valeurs prises par ces trois grandeurs aux différents points du circuit, on peut déjà avoir une idée précise du fonctionnement de ce circuit et donc identifier une de ses éventuelles défaillances.

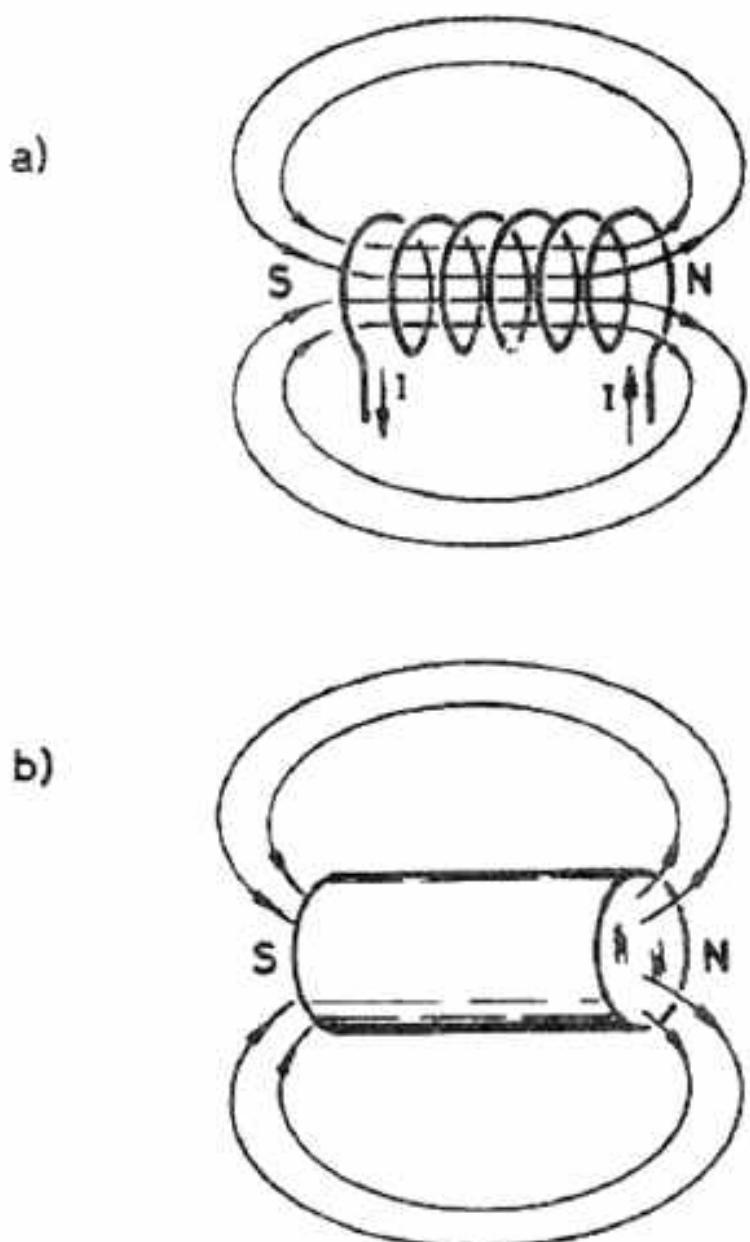
Dans cette leçon, nous étudierons les appareillages et les circuits (les plus couramment utilisés) pour mesurer les courants, les tensions et les résistances.

1 - MESURE DU COURANT

Occupons-nous d'abord de la mesure du courant car, comme nous le verrons par la suite, les mesures de la tension et de la résistance se font par l'intermédiaire de cette mesure.

Dans une des leçons précédentes, nous vous avons déjà dit que l'on peut mesurer le courant électrique en exploitant un des effets qu'il produit en traversant un conducteur ; généralement on utilise l'effet magnétique du courant, c'est-à-dire la propriété qu'il a de produire un champ magnétique autour des conducteurs qu'il traverse.

Dans la pratique, le courant à mesurer passe dans une bobine, et produit ainsi un champ magnétique dont les lignes de force, indiquées sur la figure 1 - a, ont le sens déterminé par le sens de circulation du courant, conformément à la loi du tire-bouchon.



EQUIVALENCE ENTRE UNE BOBINE PARCOURUE
PAR UN COURANT ET UN AIMANT

Figure 1

Nous observons que ces lignes de force sortent de l'extrémité droite de la bobine et rentrent par son extrémité gauche après avoir traversé l'espace extérieur, dans lequel elles progressent comme les lignes de force d'un aimant permanent, comme on le voit sur la *figure b*.

En ce qui concerne l'espace extérieur, la bobine se comporte donc comme un aimant permanent, et nous pouvons donc considérer comme pôle nord et pôle sud les extrémités de la bobine par lesquelles les lignes de force sortent et entrent.

Pour ces pôles de la bobine, on peut également appliquer la loi générale que nous connaissons déjà, selon laquelle les pôles de même nom se repoussent, tandis que les pôles de nom contraire s'attirent ; on peut constater ceci, par exemple, au moyen du dispositif de la *figure 2*, qui, avec des modifications particulières, sert aussi à mesurer les courants.

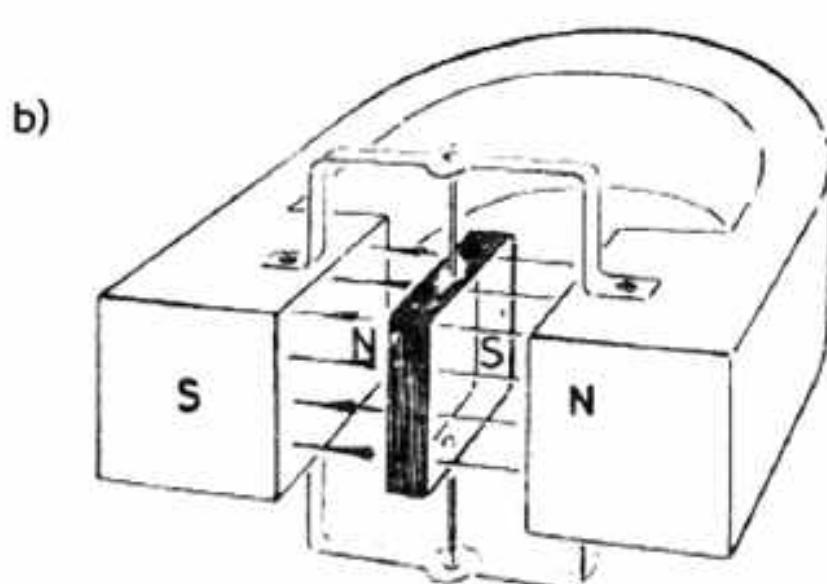
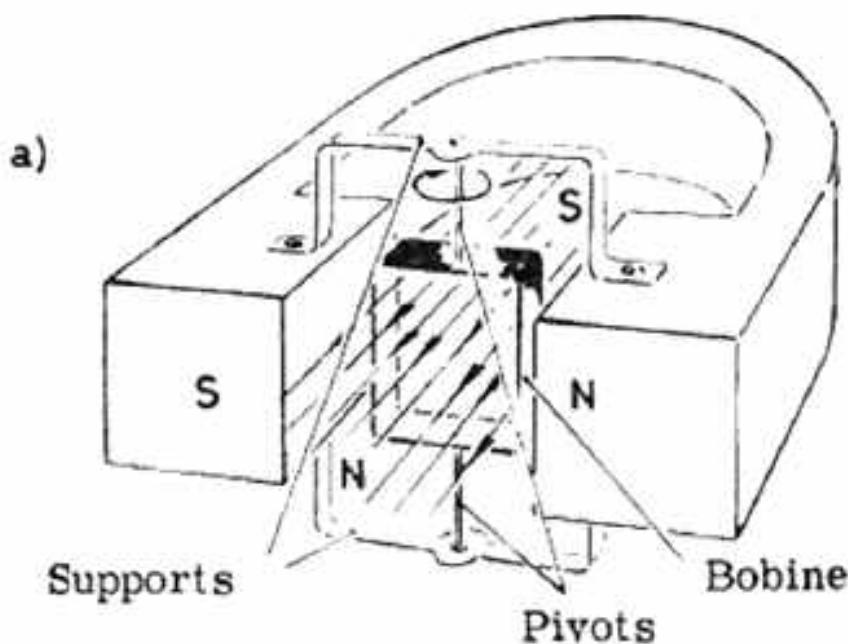
Comme on le voit sur cette figure, on a placé entre les pôles d'un aimant en forme de U, une bobine enroulée sur un petit châssis léger muni de deux pivots qui s'appuient sur des supports spéciaux, de façon à ce que la bobine soit libre de tourner autour d'un axe vertical.

Supposons que l'enroulement soit parcouru par un courant qui circule dans un sens tel qu'il produise des lignes de force dirigées comme on le voit sur la *figure 2 - a* ; le pôle nord et le pôle sud de la bobine sont dans les positions indiquées par cette figure.

Dans ces conditions on constate que le pôle nord de la bobine est repoussé par le pôle nord de l'aimant et attiré par son pôle sud ; de la même façon, le pôle sud de la bobine est repoussé par le pôle sud de l'aimant et attiré par son pôle nord, en accord avec la loi dont nous avons parlé plus haut.

Par suite de ces répulsions et de ces attractions entre les pôles de l'aimant et de la bobine, celle-ci tourne dans le sens indiqué par la flèche de la *figure 2 - a*, jusqu'à ce qu'elle s'arrête dans la position de la *figure 2 - b*, portant ainsi son pôle nord près du pôle sud de l'aimant et son pôle sud près du pôle nord de cet aimant.

On a aussi constaté que les forces de répulsion et d'attraction qui s'exercent entre les pôles sont d'autant plus importantes que le courant qui parcourt la bobine est plus grand. Ce fait a permis d'utiliser le dispositif de la *figure 2* pour la mesure du courant.



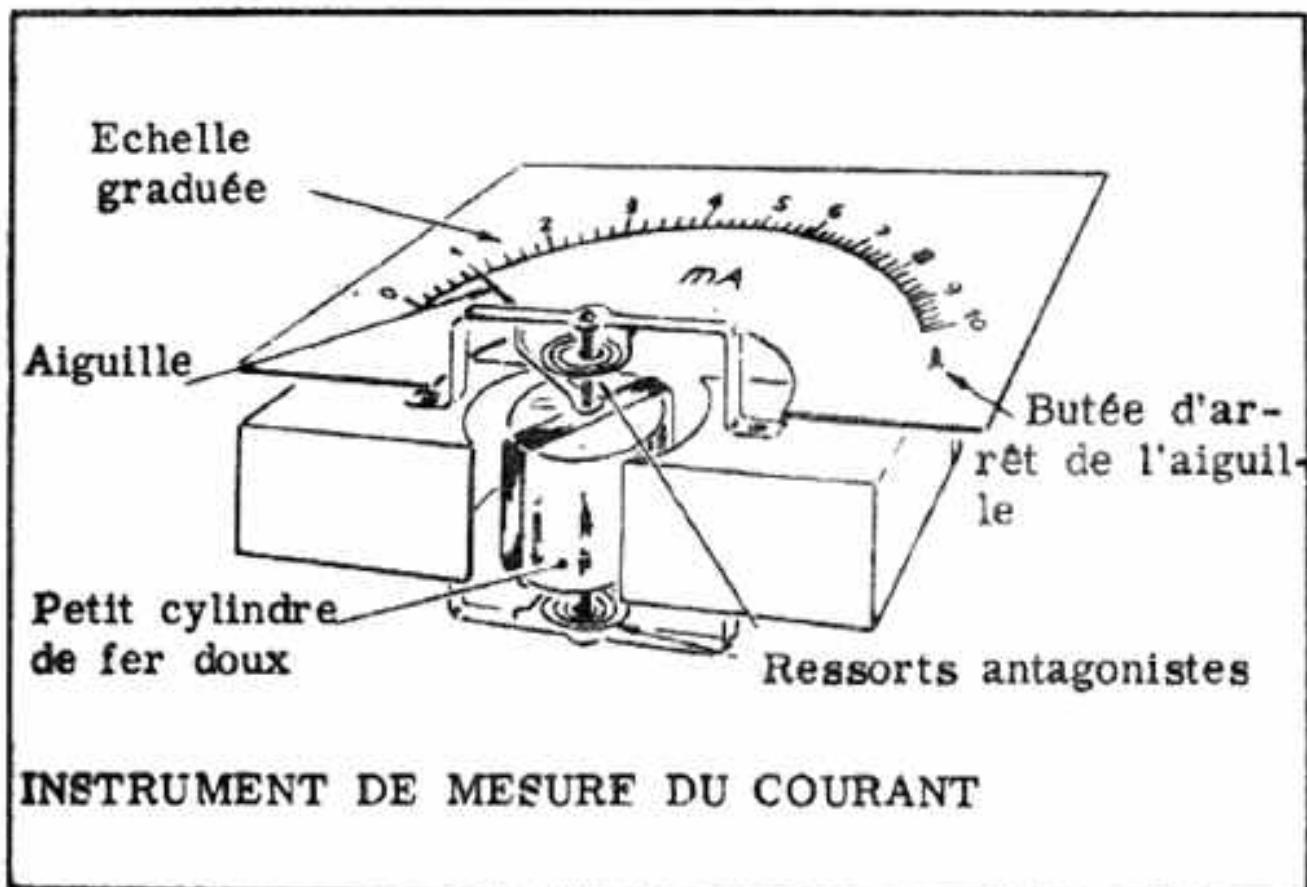
ROTATION D'UNE BOBINE PARCOURUE PAR UN COURANT ET PLACEE ENTRE LES POLES D'UN AIMANT

Figure 2

Pour cela le dispositif est modifié comme sur la *figure 3*, et l'on réalise ainsi un *INSTRUMENT DE MESURE* du courant, appelé aussi *GALVANOMETRE A BOBINE MOBILE* à cause de la rotation que sa bobine peut accomplir, rotation qui sert à déplacer en face d'un *CADRAN GRADUE* une *AIGUILLE* fixée à cette bobine.

A l'intérieur de la bobine, on place un petit cylindre de fer doux qui est fixe, c'est-à-dire qui ne tourne pas avec la bobine, tandis que les extrémités des pôles de l'aimant sont profilées de façon à réduire au minimum l'en-trefer, ou l'espace occupé par l'air, dans lequel se déplace la bobine durant sa rotation.

Avec ces précautions on obtient un champ magnétique important et l'on peut mesurer ainsi les courants d'intensité très réduite, car les forces dues à ce champ important sont suffisantes pour déterminer la rotation de la bobine, même si le courant réduit qui la parcourt crée un champ très faible.



INSTRUMENT DE MESURE DU COURANT

Figure 3

De plus, les lignes de force du champ produit par l'aimant sont disposées uniformément autour de la bobine, ce qui permet d'obtenir un cadran avec des graduations équidistantes, comme on le voit sur la *figure 3*.

Notons enfin qu'autour des pivots de la bobine, il y a deux ressorts à spirales dont une extrémité est fixée aux pivots et l'autre aux supports ; ces ressorts sont disposés de façon à pouvoir entraver la rotation de la bobine et pour cette raison on les appelle des *RESSORTS ANTAGONISTES*.

Pour nous rendre compte de la fonction exécutée par les ressorts antagonistes, étudions le fonctionnement de l'instrument.

Quand aucun courant ne parcourt la bobine, les ressorts maintiennent cette bobine dans une position telle que son aiguille se trouve en face de l'extrême gauche du cadran, où le zéro est indiqué ; ce zéro indique que le courant est nul : dans ces conditions on dit que l'aiguille se trouve dans la *POSITION DE REPOS*.

Quand un courant parcourt la bobine, celle-ci tourne comme nous l'avons vu précédemment et son aiguille se déplace vers la droite en s'éloignant de la position de repos, comme on le voit sur la *figure 3*. La rotation de la bobine agit alors sur les ressorts fixés aux pivots en les faisant se tendre, ce qui donne naissance à des forces qui entravent cette rotation, car elles cherchent à repousser la bobine et son aiguille vers la gauche, c'est-à-dire vers la position de repos.

Au fur et à mesure que la bobine tourne, les ressorts se tendent de plus en plus et par conséquent les forces qui entravent la rotation augmentent jusqu'à ce qu'elles soient égales à celles qui déterminent cette rotation : dans ces conditions la bobine s'arrête car il y a équilibre entre les forces dues au courant, qui tendent à la faire tourner vers la droite, et les forces dues aux ressorts, qui tendent à la reporter vers la gauche.

Supposons, par exemple, que la bobine et son aiguille se soient arrêtées dans la position indiquée par la *figure 3* : si l'on augmente maintenant le courant qui parcourt la bobine, celle-ci se remet à tourner vers la droite car avec le courant augmentent aussi les forces qui déterminent la rotation dans ce sens, et l'équilibre est donc altéré.

D'autre part, à cause de la nouvelle rotation, les ressorts se tendent encore et les forces qui leur sont dues augmentent à leur tour, jusqu'à ce qu'elles équilibrent de nouveau les forces dues au courant ; quand ceci se

produit, la bobine s'arrête dans une nouvelle position, plus éloignée que la précédente de la position de repos.

Nous voyons en somme, qu'à chaque valeur du courant correspond une position bien déterminée prise par l'aiguille. Pour mesurer les courants avec ce galvanomètre, il suffit donc de connaître les valeurs du courant qui correspondent aux différentes positions de l'aiguille.

Pour cela on peut faire parcourir la bobine du galvanomètre par différents courants de valeur connue, soit d'abord par un courant de 1 mA, puis de 2 mA, puis de 3 mA, etc... ; on marque ensuite ces valeurs sur le cadran en face de la position prise par l'aiguille pour chaque courant.

Quand ces valeurs sont inscrites sur le cadran, le galvanomètre peut servir pour la mesure d'un courant dont on ne connaît pas la valeur : en effet, on peut maintenant lire cette valeur directement sur le cadran d'après la position dans laquelle l'aiguille s'arrête quand le galvanomètre est traversé par le courant à mesurer.

Par exemple, les nombres reportés sur l'échelle graduée de la *figure 3* indiquent la valeur du courant en milliampères, comme on le voit sur l'inscription "mA", symbole du milliampère, que l'on trouve sous le cadran.

Si nous faisons donc traverser ce galvanomètre par un courant à mesurer, et si nous voyons son aiguille s'arrêter en face du nombre 1, comme sur la *figure 3*, nous pouvons dire que le courant a une valeur de 1 mA. Puisque cet instrument sert en somme à mesurer les milliampères, on l'appelle un *MILLIAMPEREMETRE*.

De tous les nombres inscrits sur le cadran d'un galvanomètre, le plus important est celui qui se trouve à l'extrémité droite, c'est-à-dire à la *FIN DE L'ECHELLE*, car il indique le *CALIBRE* du galvanomètre, c'est-à-dire *le courant maximum que celle-ci peut mesurer*.

Le galvanomètre de la *figure 3* a un calibre de 10 mA car, comme nous le voyons sur la figure, le nombre inscrit au bout du cadran est justement 10.

Chaque galvanomètre est caractérisé par son calibre, qui est une donnée dont on doit se souvenir lorsqu'on utilise un galvanomètre déterminé, pour éviter de le faire traverser par un courant supérieur au courant maximum qu'il peut mesurer.

En effet, si ceci se produisait, le galvanomètre pourrait se détériorer

d'autant plus gravement que le courant qui le traverse est supérieur à son calibre.

Supposons, par exemple, que le galvanomètre de la *figure 3* soit traversé par erreur par un courant de 20 mA. Dans ce cas, les forces qui déterminent la rotation de la bobine vers la droite sont multipliées par deux par rapport à celles qui sont nécessaires pour porter l'aiguille à la fin de l'échelle. Par conséquent, l'aiguille dépasse très vite la position terminale et peut être déformée par le choc violent contre la butée qui, comme on le voit sur la *figure 3*, est placé peu après la fin de l'échelle, pour arrêter l'aiguille.

Une autre donnée caractéristique d'un galvanomètre à bobine mobile est sa *RESISTANCE INTERNE*, c'est-à-dire la résistance que le courant à mesurer rencontre quand il passe dans ce galvanomètre ; cette résistance est due au conducteur enroulé qui constitue la bobine mobile et peut être comprise entre quelques dizaines et quelques centaines d'ohms, selon le type de galvanomètre.

Dans certains cas, la résistance interne peut avoir une influence sur la mesure ; nous pourrons le constater en étudiant l'insertion d'un instrument de mesure du courant, c'est-à-dire la manière de relier cet instrument à un circuit pour mesurer le courant qui y circule.

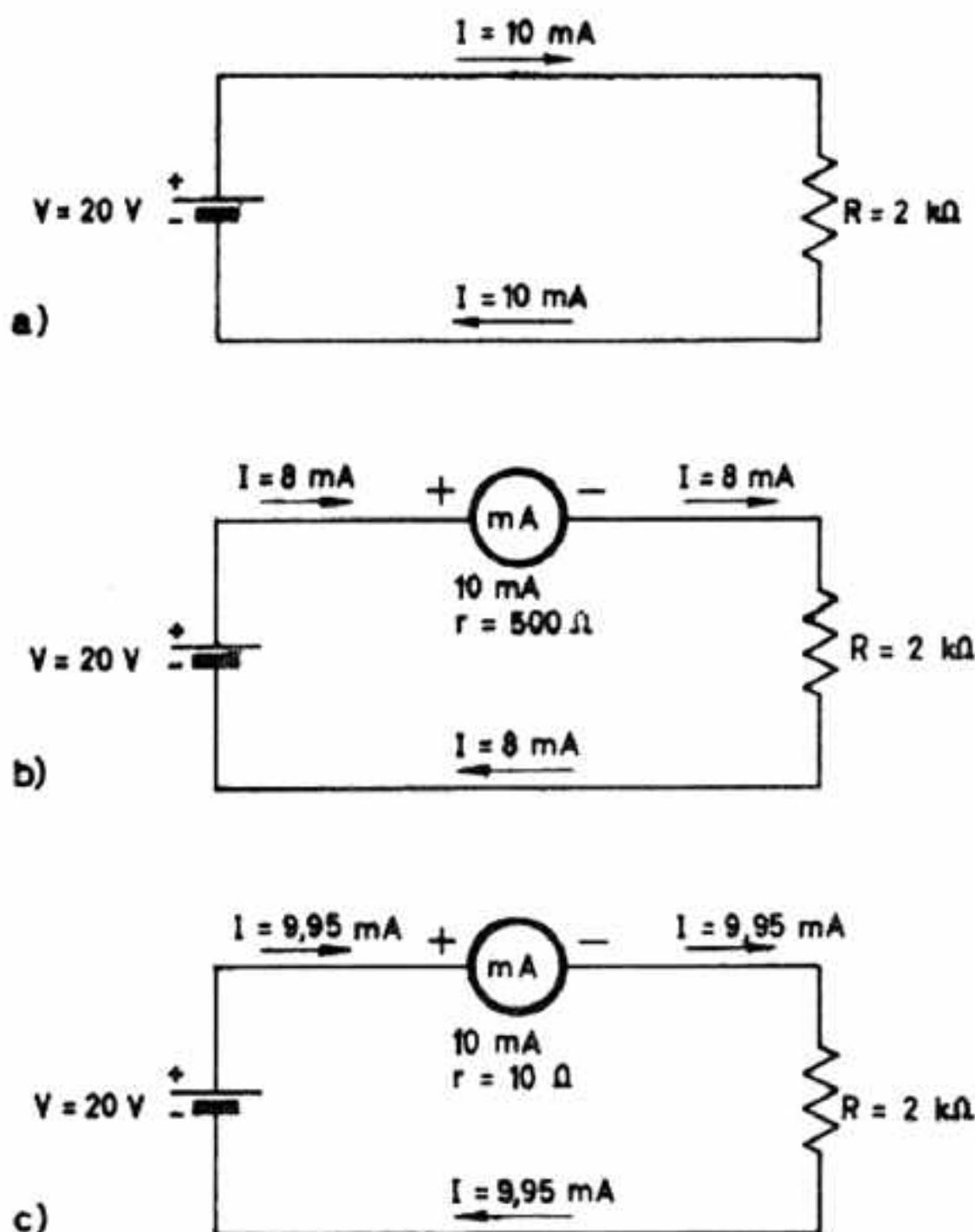
Puisque le courant à mesurer doit traverser le galvanomètre, il est évident que celui-ci doit être relié en série avec le circuit dans lequel circule ce courant.

Supposons, par exemple, que l'on veuille mesurer le courant qui circule dans le circuit de la *figure 4 - a* : puisque ce circuit est alimenté par une tension de 20 V et qu'il présente une résistance de $2 \text{ k}\Omega$, le courant qui y circule est de $20 : 2 = 10 \text{ mA}$.

Nous vous faisons observer que, comme on a exprimé la résistance en kilohms, plutôt qu'en ohms, le courant est exprimé en milliampères au lieu d'être exprimé en ampères.

Ainsi les opérations sont plus simples, car elles peuvent être faites avec des nombres qui ne comportent pas trop de zéros ; si au contraire on avait utilisé comme unité de mesure l'ohm et l'ampère, on aurait dû faire la division $20 : 2.000 = 0,01$.

Puisque le courant qui circule dans le circuit a une intensité de 10 mA nous pouvons le mesurer avec un milliampèremètre d'un calibre de 10 mA à la fin de l'échelle, comme celui de la *figure 3*.



INSERTION D'UN MILLIAMPFREMETRE

Figure 4

Sur la figure 4 - b, on voit l'insertion de ce galvanomètre représenté au moyen d'un petit cercle à l'intérieur duquel l'inscription "mA" rappelle qu'il s'agit d'un milliampèremètre.

Sous le symbole graphique du galvanomètre est aussi indiqué le calibre avec l'inscription "10 mA f. e.", ce qui signifie "10 mA à la fin de l'échelle"; la résistance interne r du milliampèremètre est aussi indiquée, elle est de 500Ω , c'est-à-dire de $0,5 \text{ k}\Omega$.

Puisque le milliampèremètre est relié en série au circuit, sa résistance interne de $0,5 \text{ k}\Omega$ s'ajoute à celle de $2 \text{ k}\Omega$ de la résistance R et, après l'insertion du milliampèremètre, le circuit présente donc une résistance totale de $0,5 + 2 = 2,5 \text{ k}\Omega$.

Dans ces conditions, le courant qui parcourt le circuit est de: $20 : 2,5 = 8 \text{ mA}$: nous voyons donc que l'insertion du milliampèremètre perturbe le fonctionnement du circuit, en faisant diminuer le courant de 10 mA à 8 mA .

Le milliampèremètre indiquera un courant de 8 mA , tandis qu'en réalité le courant qui parcourt le circuit, quand l'instrument n'est pas inséré, est de 10 mA .

Nous ne pouvons donc pas connaître avec exactitude le courant qui circule dans le circuit, car la résistance interne du galvanomètre fait augmenter la résistance du circuit et par conséquent diminuer le courant; pour obtenir une mesure plus exacte, nous devons donc utiliser un galvanomètre qui ait une résistance interne bien plus faible.

Par exemple, si l'on insère dans le circuit un milliampèremètre dont la résistance interne est de 10Ω seulement, c'est-à-dire de $0,01 \text{ k}\Omega$, comme sur la figure 4 - c, la résistance du circuit augmentera à peine de $2 \text{ k}\Omega$ à $2,01 \text{ k}\Omega$ et le courant sera donc de $20 : 2,01 = 9,95 \text{ mA}$.

Cette valeur ne diffère que de $0,05 \text{ mA}$ de la valeur réelle du courant qui est de 10 mA , et dans ce cas la mesure est suffisamment approximative pour les études pratiques.

Ces exemples nous permettent donc de conclure qu'un instrument de mesure du courant fournit des indications d'autant plus exactes que sa résistance interne est plus faible.

Observons enfin que, pour l'insertion d'un instrument de mesure d'un courant, il faut tenir compte du sens dans lequel le courant doit parcourir la bobine mobile.

Nous avons vu en effet que le sens des lignes de force, et donc les pôles qui se créent aux extrémités de la bobine, dépendent du sens de la circulation du courant : si ce courant circule dans le sens contraire de celui dans lequel il devrait circuler, les lignes de force sont également dirigées en sens contraire : à une extrémité de la bobine, on aura donc le pôle sud au lieu du pôle nord, et inversement.

Par suite de cette inversion des pôles, le sens dans lequel tourne la bobine est aussi inversé, et l'aiguille se déplace donc à gauche de la position de repos, au lieu que ce soit à droite. Elle sort donc des limites de l'échelle, et il n'est pas possible de lire la valeur du courant.

Pour éviter que le galvanomètre ne soit inséré ainsi, le constructeur distingue les deux extrémités de la bobine en les marquant des signes + et -, pour indiquer que le courant doit parcourir la bobine de l'extrémité positive vers l'extrémité négative, en accord avec le sens conventionnel selon lequel le courant est dirigé du positif vers le négatif.

Ces signes sont aussi indiqués à côté du galvanomètre sur les schémas de la figure 4 ; on peut ainsi voir que *le courant qui traverse le millampèremètre est toujours dirigé du positif au négatif*.

Le fait que le déplacement de l'aiguille dépende du sens dans lequel circule le courant dans la bobine mobile a pour conséquence qu'*un instrument de ce type ne peut pas être utilisé pour mesurer les courants alternatifs*.

En effet, ces courants parcourraient la bobine mobile de son extrémité positive vers son extrémité négative pendant une demi-période et en sens contraire pendant la demi-période suivante ; à chaque cycle du courant, l'aiguille devrait se déplacer d'abord d'un côté de la position de repos puis de l'autre.

Puisque le courant alternatif a une fréquence de 50 Hz, et qu'il accomplit donc 50 cycles par seconde, l'aiguille devrait répéter 50 fois par seconde ce déplacement autour de la position de repos. En réalité, l'aiguille ne peut accomplir des déplacements aussi rapides, et elle reste donc dans la position de repos sans indiquer aucun courant.

L'impossibilité de mesurer les courants alternatifs avec un galvanomètre à bobine mobile ne constitue pourtant pas un inconvénient, puisque *tous les courants que nous devons mesurer dans les circuits électroniques sont continus*.

Jusqu'à maintenant nous avons étudié un milliampermètre avec un calibre de 10 mA, mais très souvent le radiotéchnicien doit mesurer des courants d'intensité plus grande, atteignant quelques centaines de millampères. On peut mesurer ces courants avec le même galvanomètre que celui que nous venons d'étudier, en augmentant son calibre comme nous allons le voir.

Référons-nous par exemple, au circuit de la *figure 5 - a*, où la batterie de 100 V fait circuler dans la résistance de $5\text{ k}\Omega$ un courant de $100:5=20\text{ mA}$ et supposons que l'on veuille mesurer ce courant avec un galvanomètre qui ait justement un calibre de 10 mA.

Puisque le calibre du galvanomètre (10 mA) est à peine égal à la moitié du courant à mesurer (20 mA), il faut qu'il n'y ait que la moitié de ce courant qui traverse le galvanomètre pour ne pas le détériorer.

On relie donc en parallèle au galvanomètre une résistance, appelée *RESISTANCE SHUNT* ou plus simplement un *SHUNT*, de façon à ce que l'autre moitié du courant, qui ne doit pas parcourir l'instrument, puisse passer dans ce shunt.

Pour cela il faut que le shunt ait une résistance égale à la résistance interne de l'instrument ; puisque dans le cas de la *figure 5 - a*, le milliampermètre a une résistance interne r de 10Ω , on a donc adopté pour la résistance R_s du shunt la valeur de 10Ω .

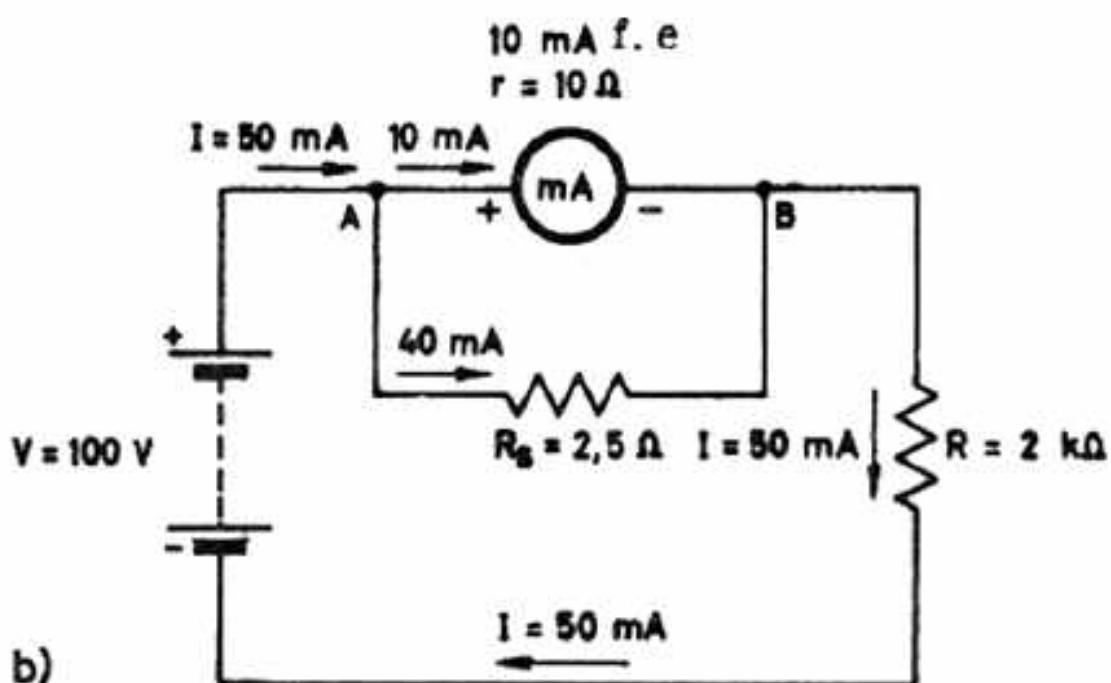
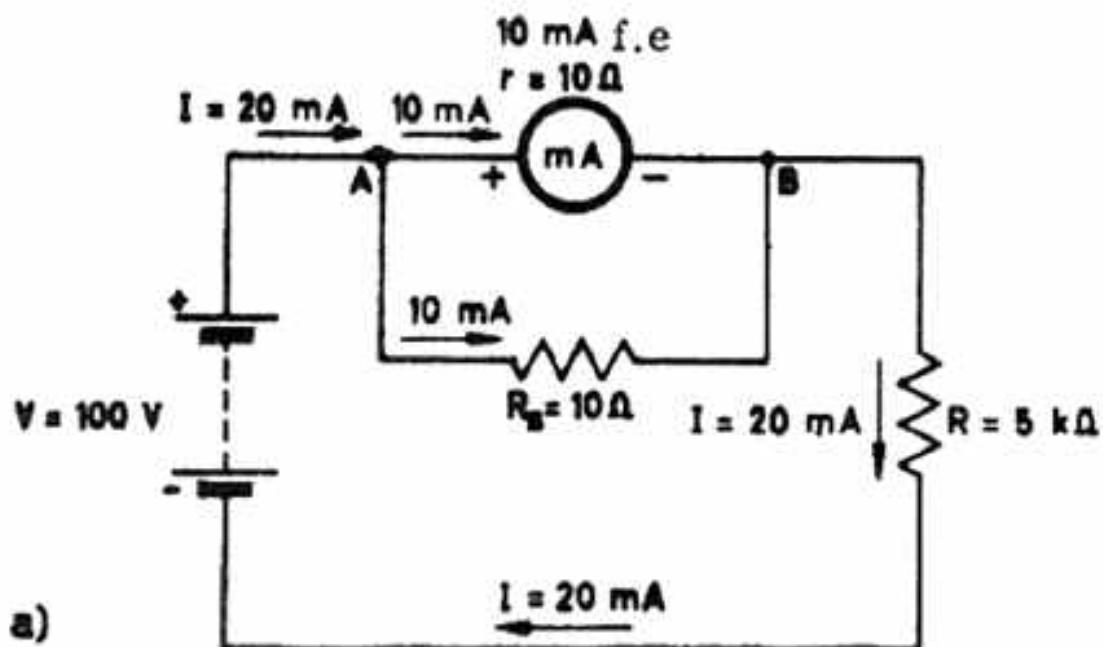
Ainsi, le courant I de 20 mA, arrivé au point A, se divise en deux courants égaux de 10 mA chacun : l'un parcourt le shunt, tandis que l'autre traverse le galvanomètre, qui indique ainsi la valeur de 10 mA.

Le galvanomètre qui a un shunt relié à ses extrémités mesure donc la moitié du courant qui circule dans le circuit ; on peut donc en connaître la valeur en multipliant par deux la valeur lue sur le cadran.

Dans ce cas particulier, le shunt sert à multiplier par deux le calibre du milliampermètre, et permet de connaître la valeur des courants jusqu'à un maximum de 20 mA ; mais on peut aussi tripler, quadrupler, etc..., le calibre d'un galvanomètre, en choisissant correctement la valeur du shunt.

Sur la *figure 5 - b*, on voit, par exemple, comment on peut quintupler le calibre du galvanomètre étudié plus haut, pour pouvoir ainsi mesurer des courants jusqu'à un maximum de 50 mA.

Dans ce cas, pour que dans le galvanomètre passe encore un courant maximum de 10 mA, il faut que le shunt soit traversé par un courant de



AUGMENTATION DU CALIBRE D'UN MILLIAMPERE-METRE

Figure 5

40 mA, quatre fois plus intense. On obtient ceci en donnant au shunt une valeur quatre fois plus petite que celle de la résistance interne du galvanomètre, c'est-à-dire une valeur de $2,5\Omega$. Ainsi le galvanomètre ne mesure qu'un cinquième du courant qui circule dans le circuit, et on obtiendra maintenant sa valeur en multipliant par cinq la valeur lue sur le cadran.

Des deux exemples de la figure 5, on déduit donc que, quand on veut doubler le calibre d'un galvanomètre, il suffit d'utiliser un shunt d'une valeur égale à celle de la résistance interne du galvanomètre ; quand au contraire on veut augmenter le calibre de plus du double de sa valeur, on doit utiliser un shunt dont la valeur est autant de fois plus petite par rapport à la résistance du galvanomètre que le courant devant traverser ce shunt est plus grand que le courant maximum pouvant parcourir le galvanomètre.

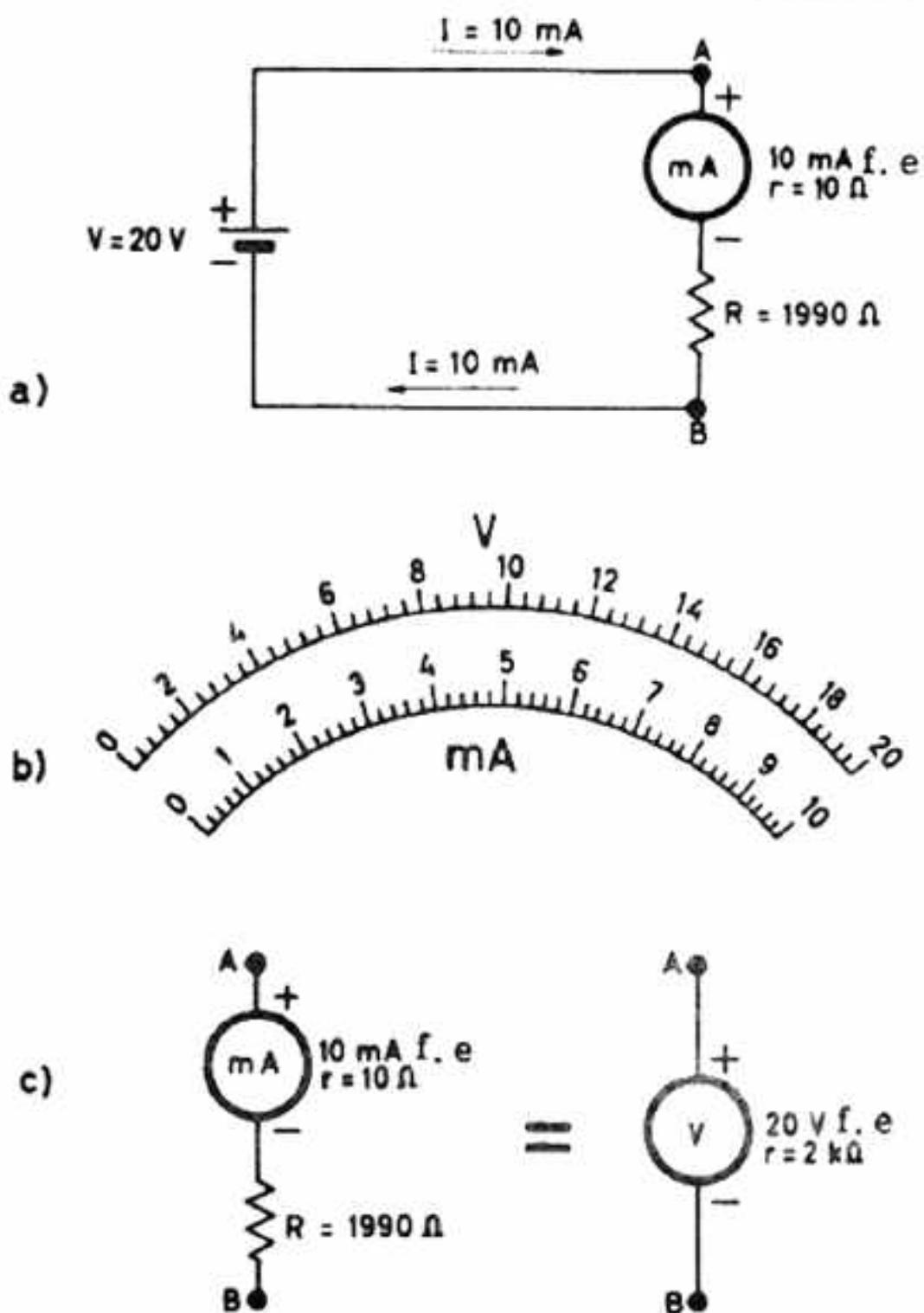
La possibilité d'augmenter facilement le calibre d'un galvanomètre grâce aux shunts permet d'utiliser non seulement les millampèremètres mais aussi les *MICROAMPEREMETRES*, c'est-à-dire des instruments dont le calibre est de l'ordre des microampères. L'emploi d'instruments avec un courant de fin d'échelle très réduit est utile en radiotéchnique pour la mesure des tensions, comme nous allons le voir.

2 - MESURE DE LA TENSION

On peut mesurer la tension électrique avec le même galvanomètre à bobine mobile que celui qui a servi à la mesure du courant.

Pour nous en rendre compte, étudions la figure 6 - a, sur laquelle on a encore reporté le circuit de la figure 4 - c, avec la seule différence que la résistance R, au lieu d'avoir la valeur de $2\text{ k}\Omega$, c'est-à-dire de 2000Ω , a la valeur de 1990Ω . De cette façon, en tenant compte de la résistance interne du millampèremètre, qui est de 10Ω , le circuit présente au total la résistance de $1990+10=2000\Omega$, soit $2\text{ k}\Omega$: il y circule donc un courant de 10 mA qui est exactement indiqué par le galvanomètre.

Notons maintenant que le galvanomètre indique le courant de 10 mA quand la pile applique une tension de 20 V à l'instrument et à la résistance en série, c'est-à-dire aux deux éléments compris entre les points indiqués par A et B sur la figure 6 - a.



MILLIAMPEREMETRE UTILISE COMME VOLTMETRE

Figure 6

En effet, d'après la loi d'Ohm, la tension de 20 V de la pile doit être égale au produit du courant de 10 mA, qui parcourt l'instrument par la "résistance" placée en série, (la résistance de $2\text{ k}\Omega$ présentée au total par ces deux éléments). On a bien alors : $10 \times 2 = 20\text{ V}$.

On comprend donc pourquoi, même si nous ne connaissons pas la valeur de la tension de la pile, nous pourrions toujours la déterminer en multipliant le courant indiqué par le galvanomètre par la résistance de $2\text{ k}\Omega$.

Supposons par exemple que l'on remplace la pile de 20 V par une autre pile ayant une tension inconnue et que, dans ces conditions, le milliampermètre indique un courant de 6 mA : en multipliant ce courant par la résistance de $2\text{ k}\Omega$ ($6 \times 2 = 12$), nous trouvons que la nouvelle pile fournit une tension de 12 V.

L'ensemble formé par le galvanomètre et par la résistance placée en série peut donc servir pour mesurer la tension appliquée entre les extrémités A et B de ces deux éléments.

Comme nous l'avons vu, pour connaître la valeur de cette tension, il faut multiplier le courant indiqué par le galvanomètre par la résistance comprise entre les points A et B ; on peut toutefois éviter de faire cette multiplication en écrivant directement sur l'instrument les valeurs de la tension, comme sur la figure 6 - b.

Au-dessus de l'échelle de l'instrument qui, comme nous l'avons vu sur la figure 3 sert à lire les milliampères, on a fait une seconde échelle. Sur celle-ci chaque valeur de la tension est inscrite en face de la valeur du courant indiquée par le galvanomètre quand cette tension est appliquée entre les points A et B.

Par exemple, la valeur de 20 V est inscrite en face de la valeur de 10 mA car le galvanomètre indique ce courant quand cette tension est appliquée entre A et B.

Puisque le galvanomètre indique directement la tension en volt, le milliampèremètre avec la résistance en série est appelé *VOLTMETRE*.

Dans les schémas, on représente en général le voltmètre non pas comme un milliampèremètre avec une résistance en série, mais par le symbole graphique indiqué sur la figure 6 - c, c'est-à-dire par un petit cercle dans lequel est inscrite la lettre V, symbole du volt.

A côté du symbole graphique du voltmètre, on indique le calibre et la résistance interne.

Le calibre du voltmètre indique la tension maximum que l'on peut mesurer : le voltmètre de la *figure 6* a un calibre de 20 V f. e. car avec cette tension l'aiguille du milliampèremètre est à la fin de l'échelle.

En ce qui concerne la résistance interne on indique pour le voltmètre la résistance totale obtenue en faisant la somme de la résistance interne du milliampèremètre et de la résistance placée en série : le voltmètre de la *figure 6* a donc une résistance interne de $2\text{ k}\Omega$.

La résistance que l'on relie en série au milliampèremètre pour pouvoir l'utiliser comme voltmètre est appelé *RESISTANCE ADDITIONNELLE*. La valeur de celle-ci détermine le calibre du voltmètre.

Supposons, par exemple, que l'on veuille utiliser le milliampèremètre étudié jusqu'à maintenant pour réaliser un voltmètre d'un calibre de 50 V f. e.

Ceci signifie que, dans le milliampèremètre, doit passer un courant de fin d'échelle de 10 mA quand on mesure une tension de 50 V : selon la loi d'Ohm, le voltmètre doit présenter une résistance interne de $50:10=5\text{k}\Omega$, c'est-à-dire de 5000Ω .

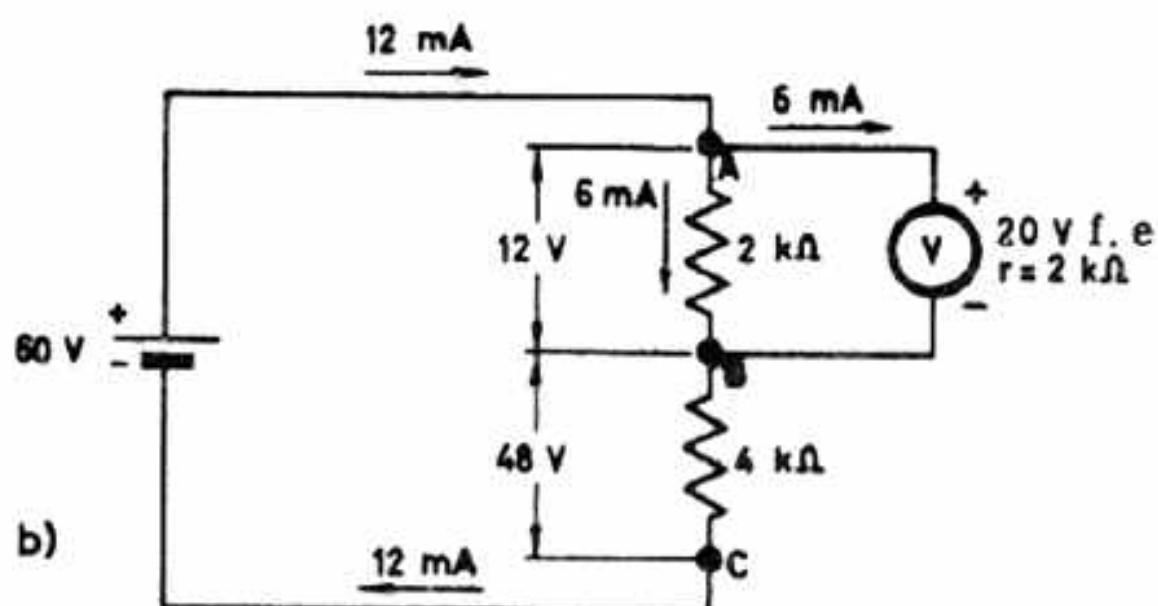
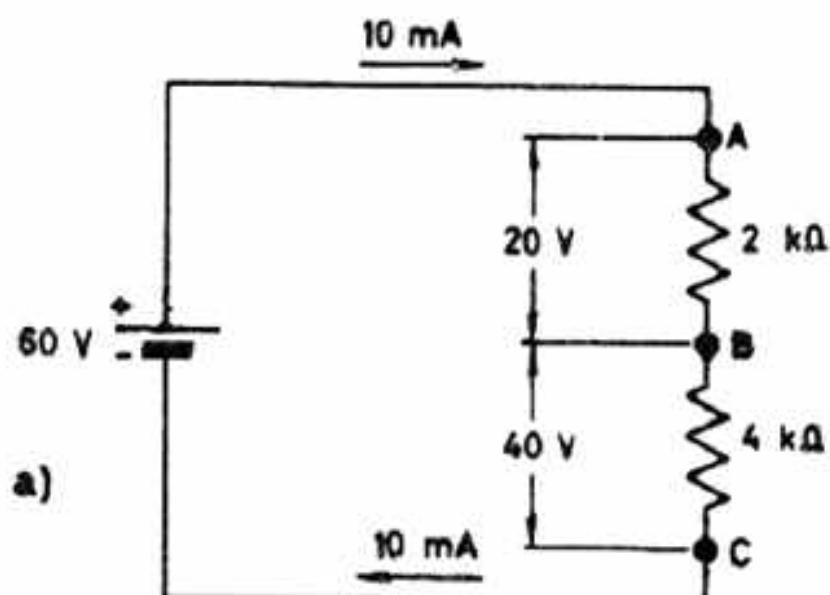
Puisque le milliampèremètre a une résistance interne de 10Ω , il faut utiliser une résistance additionnelle de $5.000-10=4990\Omega$.

Rappelons-nous donc que la valeur à donner à la résistance additionnelle s'obtient en divisant la tension maximum que l'on veut mesurer par le courant de fin d'échelle du galvanomètre, et en soustrayant du résultat obtenu la résistance interne de l'instrument.

Notons enfin, que sur la *figure 6 - c*, les extrémités du voltmètre sont indiquées par les signes + et -, car le courant qui passe dans l'instrument grâce à la tension que l'on mesure doit être dirigé du positif au négatif pour que l'aiguille se déplace vers la droite.

Evidemment, avec cet instrument on ne peut pas mesurer des tensions alternatives car elles feraient circuler le courant non seulement du positif au négatif, mais aussi en sens contraire.

Puisqu'en électronique, il est intéressant de mesurer également la tension alternative, on transforme cette tension en tension continue au moyen de procédés spéciaux dont nous parlerons dans les prochaines leçons.



INSERTION D'UN VOLTMETRE

Figure 7

Un voltmètre peut servir à mesurer la tension non seulement aux extrémités d'une pile mais aussi entre deux points d'un circuit entre lesquels il existe une différence de potentiel.

Par exemple, la tension de 20 V qui existe aux extrémités de la résistance de $2\text{ k}\Omega$ reliée entre les points A et B dans le circuit de la *figure 7 - a* peut être mesurée aussi avec le voltmètre de la *figure 6*, qui a justement un calibre de 20 V f. e.

Comme on le voit sur la *figure 7 - b*, le voltmètre est relié en parallèle sur la résistance, c'est-à-dire entre les points A et B entre lesquels existe la tension que l'on veut mesurer.

La différence entre ce type d'insertion et celui qui sert à mesurer le courant est évidente : pour mesurer le courant qui traverse la résistance, le milliampermètre doit être relié en série, tandis que, pour mesurer la tension qu'il y a entre les extrémités de la même résistance, le voltmètre doit être relié en parallèle.

Quand on relie en parallèle sur la résistance de $2\text{ k}\Omega$ le voltmètre dont la résistance interne est aussi de $2\text{ k}\Omega$, la conductance entre les points A et B de la *figure 7 - b* est alors doublée, car le courant peut également passer à travers le voltmètre : si la conductance est multipliée par deux, la résistance est donc réduite de moitié, c'est-à-dire de $1\text{ k}\Omega$.

En ajoutant cette résistance à celle de $4\text{ k}\Omega$ de la résistance reliée entre les points B et C, on voit que, après l'insertion du voltmètre, le circuit présente au total une résistance de $5\text{ k}\Omega$.

Dans ces conditions circule dans le circuit un courant de $60:5=12\text{ mA}$ tandis qu'avant l'insertion du voltmètre le courant était de 10 mA , comme on le voit sur la *figure 7 - a* : ceci signifie que l'insertion du voltmètre perturbe le fonctionnement du circuit en faisant varier le courant qui y circule, car une partie de ce courant doit traverser le voltmètre.

Puisque le voltmètre a une résistance interne égale à celle de la résistance sur laquelle il est relié, le courant de 12 mA se divise en deux courants égaux de 6 mA chacun, dont l'un parcourt la résistance et l'autre le voltmètre.

Aux extrémités de la résistance de $2\text{ k}\Omega$ dans lequel passe le courant de 6 mA , on obtient donc une tension de $6\times 2=12\text{ V}$, qui est indiquée par le voltmètre. Ceci est confirmé par la *figure 6 - b*, qui montre que l'instrument indique une tension de 12 V lorsqu'il est traversé par un courant de 6 mA , comme cela se produit justement dans ce cas.

Le voltmètre indique donc une tension de 12 V, inférieure d'au moins 8V à celle que l'on a entre A et B quand le voltmètre n'est pas inséré (*figure 7 - a*).

Comme on l'a dit, cette erreur dans la mesure est due au courant qui doit traverser le voltmètre, car si l'instrument n'absorbait pas de courant, il ne ferait pas varier celui qui circule dans le circuit avant son insertion.

Pour limiter l'erreur dans la mesure, il faut donc réduire le courant qui traverse le voltmètre ; on peut obtenir ceci en employant un milliampermètre avec un courant de fin d'échelle de faible intensité. C'est pour cette raison qu'en électronique, on utilise des milliampermètres et des microampèremètres, comme nous vous l'avons déjà signalé précédemment.

Le voltmètre de la *figure 7 - b* perturbe beaucoup le fonctionnement du circuit car il est constitué par un milliampermètre d'un courant de 10 mA f. e., égal à celui qui circule dans le circuit avant son insertion.

Si on utilisait, au contraire, un voltmètre constitué par un milliampermètre avec un courant de 1 mA f. e., c'est-à-dire à peine égal au dixième de celui qui circuait normalement dans le circuit, son insertion en perturberait beaucoup moins le fonctionnement et rendrait la mesure plus précise.

Pour faire passer dans cet instrument le courant de 1 mA quand on mesure une tension de 20 V, il faut que le voltmètre ait une résistance interne de $20:1=20\text{ k}\Omega$, dix fois supérieure à celle du voltmètre de la *figure 7 - b*.

Un voltmètre perturbe donc d'autant moins le circuit auquel il est relié et fournit par suite des mesures d'autant plus précises que sa résistance interne est plus grande ; mais cette résistance dépend aussi du calibre du voltmètre, comme nous l'avons vu précédemment.

Pour pouvoir comparer deux voltmètres indépendamment de leur calibre, on étudie la résistance interne qu'ils présentent pour chaque volt d'un calibre identique.

Cette donnée qui indique la *SENSIBILITE* des voltmètres peut être facilement connue en divisant la résistance interne par le calibre : on exprime la sensibilité d'un voltmètre en *OHM PAR VOLT*, que l'on écrit plus brièvement " Ω/V ".

Le voltmètre de la *figure 7 - b*, ayant une résistance interne de $2\text{ k}\Omega$, c'est-à-dire de 2.000Ω et un calibre de 20 V, présente une sensibilité de $2.000 : 20 = 100\Omega/V$.

Au contraire, le voltmètre ayant une résistance interne de $20\text{ k}\Omega$, c'est-à-dire de 20.000Ω , et un calibre de 20 V, a une sensibilité de $20000:20 = 1.000\Omega/\text{V}$, dix fois supérieure à la précédente.

Nous pouvons donc conclure qu'un voltmètre fournit des indications d'autant plus précises que sa sensibilité est plus grande.

Comme il est important d'introduire le moins de perturbations possible dans les circuits pour ne pas fausser les mesures, on n'utilise pas en électronique de voltmètres d'une sensibilité inférieure à $1.000\Omega/\text{V}$ et l'on a très souvent recours à des voltmètres ayant une sensibilité entre $5.000\Omega/\text{V}$ et $10.000\Omega/\text{V}$, et même de $20.000\Omega/\text{V}$, pour lesquels on emploie les microampèremètres.

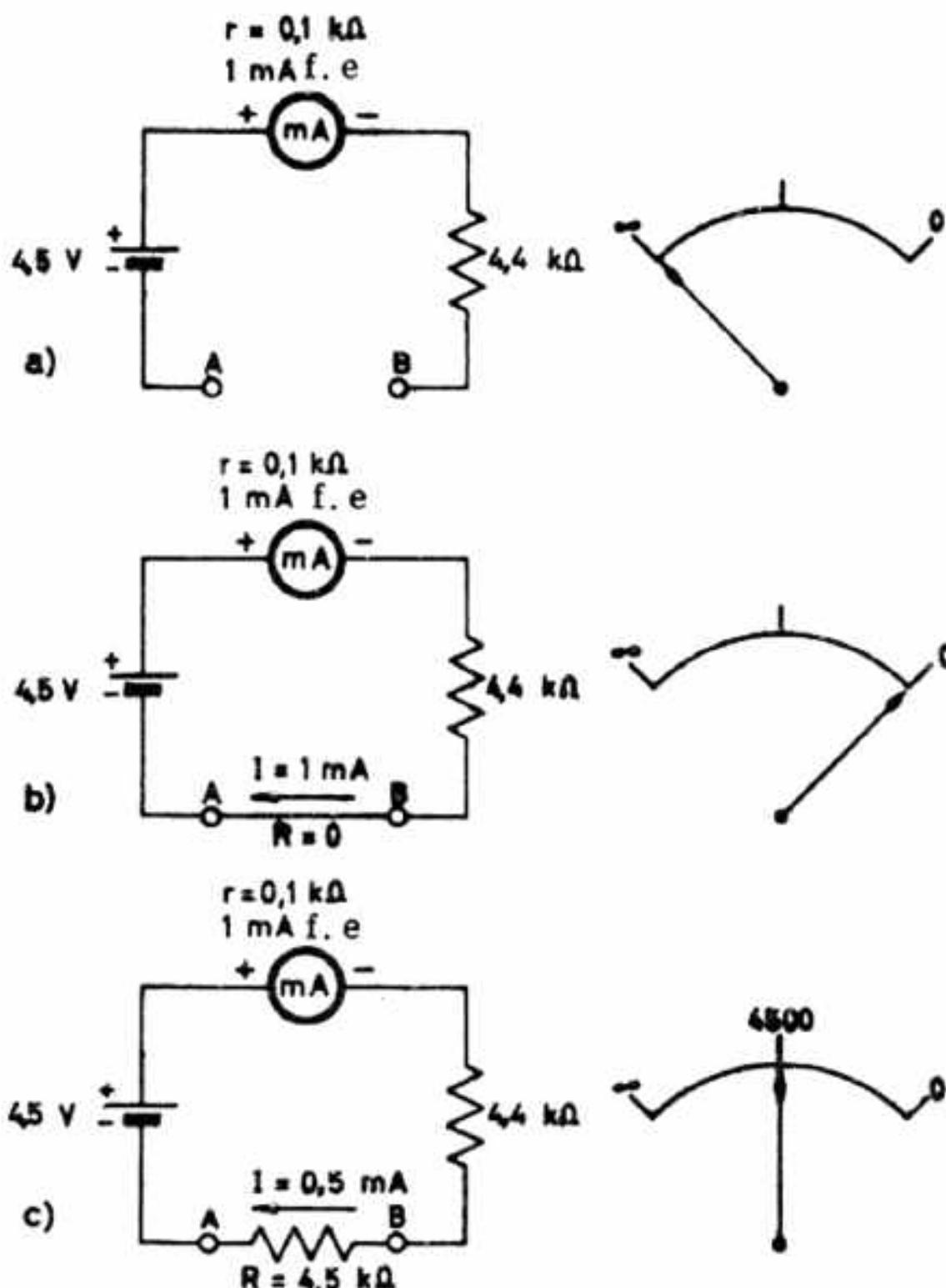
3 - MESURE DE LA RESISTANCE

Un galvanomètre à bobine mobile peut également servir à mesurer la résistance électrique, au moyen d'un circuit du type de celui qui est indiqué sur la figure 8 - a. Comme nous le verrons, le galvanomètre indique sur un cadran spécial la valeur des résistances qui sont reliées aux extrémités A et B du circuit.

Les éléments de ce circuit sont choisis de façon à ce que l'aiguille de l'instrument soit à la fin de l'échelle quand on relie entre les extrémités A et B, un simple conducteur de résistance égale à zéro (figure 8 - b), c'est-à-dire quand ces extrémités sont en court-circuit.

En utilisant une pile de 4,5 V et un galvanomètre d'un calibre de 1 mA f. e. pour faire circuler ce courant et déterminer le déplacement de l'aiguille à la fin de l'échelle, il faut que la résistance du circuit, donnée par la tension de la pile divisée par le courant, soit de $4,5\text{ k}\Omega(4,5:1=4,5\text{ k}\Omega)$. Puisqu'on suppose que l'instrument a une résistance interne de $0,1\text{ k}\Omega$, on lui a relié en série une résistance de $4,4\text{ k}\Omega$.

Si nous voulons que ce galvanomètre indique la résistance offerte entre les points A et B, nous écrivons le nombre zéro à la fin de l'échelle, comme on le voit sur la partie droite de la figure 8 - b, puisque l'aiguille est justement dans cette position quand ces points sont en court-circuit et qu'entre eux il y a donc une résistance égale à zéro.



CIRCUIT POUR LA MESURE DE LA RESISTANCE

Figure 8

Si au contraire, entre les points A et B on met une résistance de $4,5\text{ k}\Omega$, comme sur la *figure 8 - c*, on double la résistance du circuit et par conséquent on divise par deux le courant ; l'aiguille arrive donc à la moitié du cadran, c'est-à-dire *AU MILIEU DE L'ECHELLE*, comme c'est indiqué dans la partie droite de la *figure 8 - c*.

Nous inscrivons donc le nombre 4.500 qui correspond à cette position, il indique la valeur en ohms de la "résistance" reliée entre les points A et B.

Si aucune résistance n'est reliée entre A et B, comme sur la *figure 8-a* l'aiguille de l'instrument reste dans sa position de repos (indiquée dans la partie droite de la *figure 8 - a*) car aucun courant ne circule dans le circuit. On peut donc retenir que, dans ces conditions, il y a entre A et B une résistance infiniment grande ; c'est pour cela qu'on met le signe ∞ en face de la position de repos de l'aiguille : ce signe signifie que la grandeur est infiniment grande.

Si l'on pose entre A et B d'autres résistances de valeur connue, on peut marquer cette valeur sur le cadran en face du point où l'aiguille s'arrête ; ceci fait, on pourra lire directement sur le cadran la valeur des résistances reliées entre A et B que l'on doit mesurer.

Ainsi on a réalisé un *OHMMETRE*, c'est-à-dire un dispositif qui permet de mesurer la valeur des résistances en ohm.

On voit sur la *figure 8* que le cadran de l'ohmmètre a son zéro à l'extrême droite, à la différence des cadrons du milliampèremètre et du voltmètre qui ont leur zéro à l'extrême gauche, comme on le voit sur la *figure 6-b*.

Le type d'ohmmètre ainsi décrit présente un inconvénient. En effet, la pile s'épuise à l'usage et fournit une tension inférieure à 4,5 V ; par conséquent le courant qui circule dans le circuit diminue, et l'aiguille n'arrive plus à la fin de l'échelle quand, entre A et B, il y a une résistance de valeur zéro.

Dans ces conditions, l'aiguille n'indique plus la valeur zéro marquée à la fin de l'échelle, bien que la résistance mesurée ait une valeur égale à zéro. On vérifie une erreur analogue sur tous les autres points du cadran.

Pour éliminer ces erreurs de mesure, il faut faire en sorte que l'aiguille puisse arriver à la fin de l'échelle même quand la tension de la pile diminue pour cela le circuit est modifié comme sur la *figure 9*.

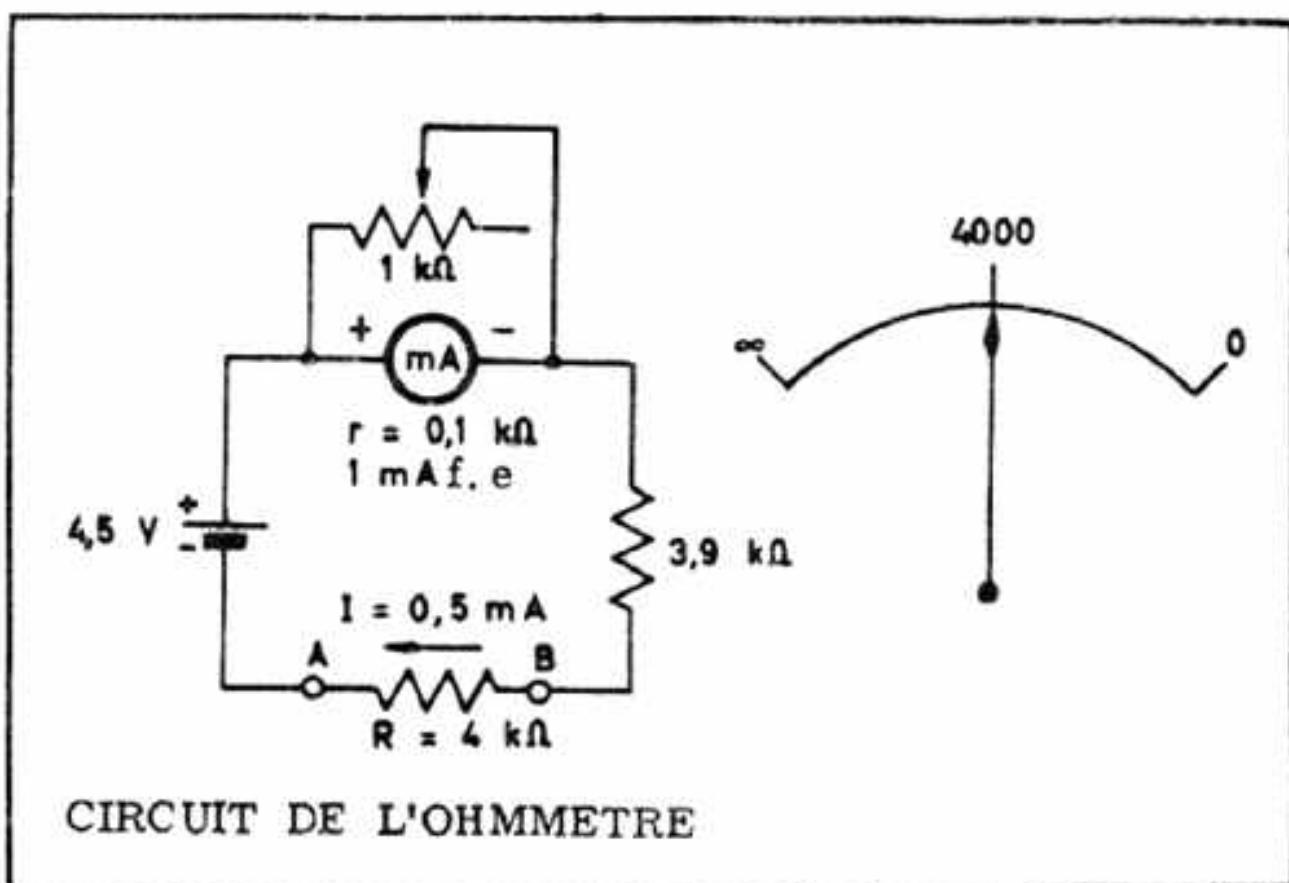


Figure 9

La valeur de la résistance reliée en série à l'instrument a été réduite à $3,9 \text{ k}\Omega$ de façon à ce que la résistance totale du circuit soit de $4 \text{ k}\Omega$ et que le courant de 1 mA puisse donc y circuler, même quand la tension de la pile descend à 4 V ($4 : 4 = 1 \text{ mA}$).

Mais quand la pile est neuve, un courant supérieur à 1 mA circulera dans le galvanomètre, et l'aiguille se déplacera alors plus loin que la fin de l'échelle. On remédié à cela en reliant en parallèle sur le galvanomètre, une résistance ajustable, comme on le voit sur la figure 9. Ainsi, une partie du courant seulement traversera l'appareil.

Puisque la résistance est ajustable, on peut régler sa valeur de façon à ce que le courant dans l'instrument garde la valeur de 1 mA , bien que la tension de la pile diminue de $4,5 \text{ V}$ à 4 V .

Avant d'utiliser l'ohmmètre, il faut donc procéder à sa *MISE A ZERO*, qui consiste à mettre les extrémités A et B en court-circuit et à régler la résistance ajustable de façon à porter l'aiguille de l'instrument sur le zéro du cadran de l'ohmmètre. Ceci fait, on peut supprimer le contact entre A et

B, et mettre entre ces points la résistance dont on veut mesurer la valeur : celle-ci sera indiquée avec exactitude par cet instrument.

Nous observons enfin que, puisque la résistance du circuit a été réduite à $4\text{ k}\Omega$, l'aiguille est au milieu de l'échelle quand la valeur de la résistance placée entre A et B est de $4\text{ k}\Omega$, comme on le voit sur la *figure 9*, et non plus de $4,5\text{ k}\Omega$ comme c'est indiqué sur la *figure 8 - c.*

Dans ce cas, on doit donc inscrire au milieu de l'échelle le nombre 4000 (comme sur la *figure 9*) car ce nombre indique en ohms la valeur de la résistance placée entre A et B.

Rappelons-nous donc que *la résistance marquée au milieu de l'échelle d'un ohmmètre indique également la résistance du circuit de l'ohmmètre lui-même.*

Ainsi nous avons vu que les mesures de courant, de tension et de résistance peuvent s'effectuer en utilisant un seul galvanomètre à bobine mobile inséré dans un circuit adapté.

Pour les mesures en électronique, on utilise les **CONTROLEURS UNIVERSELS** qui comprennent, en plus du galvanomètre, les shunts et résistances additionnelles pour augmenter le calibre dans les mesures de courant et de tension, ainsi que la pile et la résistance ajustable nécessaires pour l'ohmmètre.

Ces éléments peuvent être reliés à l'instrument pour réaliser un circuit adapté au type de mesure que l'on doit faire ; dans ce cas, le galvanomètre est muni de plusieurs échelles, qui permettent de mesurer des courants, des tensions, ou des résistances dans une large gamme de valeurs.

Ayant ainsi examiné les circuits et les procédés adoptés pour mesurer les grandeurs dont il est indispensable de connaître la valeur, nous pourrons dans la prochaine leçon commencer l'étude des circuits électroniques.

NOTIONS A RETENIR

- En ELECTRONIQUE, on utilise le plus souvent pour les mesures de COURANTS, de TENSIONS et de RESISTANCES, UN CONTROLEUR UNIVERSEL.

Celui-ci se compose essentiellement d'un GALVANOMETRE A BOBINE MOBILE, de RESISTANCES SHUNTS et de RESISTANCES ADDITIONNELLES permettant d'établir des ECHELLES adaptées aux valeurs à mesurer.

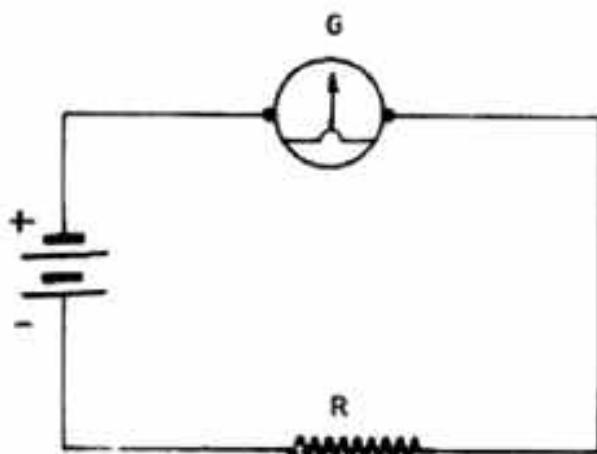
- Les deux CARACTERISTIQUES principales du GALVANOMETRE sont :
 - a) LE COURANT DE FIN D'ECHELLE,
 - b) LA RESISTANCE INTERNE.

- Un INSTRUMENT DE MESURE DE COURANTS, fournit des indications d'autant PLUS EXACTES que sa RESISTANCE INTERNE EST PLUS FAIBLE.

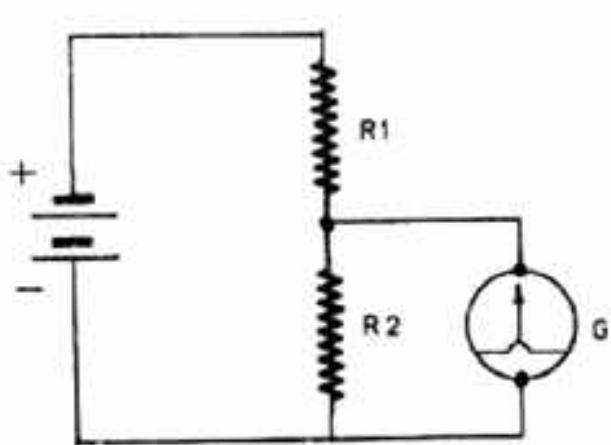
Par contre pour un instrument de mesure de TENSIONS, les INDICATIONS SONT D'AUTANT PLUS EXACTES QUE SA RESISTANCE INTERNE EST ELEVEE.

Les deux figures ci-dessous, mettent en évidence ces affirmations.

- Pour la mesure du COURANT circulant dans R, il est évident que G (galvanomètre) devrait dans le cas idéal, avoir une RESISTANCE INTERNE NULLE. En effet, l'appareil indique le courant circulant dans $R + RG$ (résistance interne du galvanomètre).



MESURE D'UN COURANT



MESURE D'UNE TENSION

EXEMPLE : Tension = 10 Volts

R = 100 Ohms

RG = 0 Ohm

Le courant indiqué par l'appareil sera dans ce cas de :

$$I = U/R = 10/100 + 0 = 0,1 \text{ A} = 100 \text{ MA}$$

Dans le même exemple, si au lieu d'avoir $RG = 0$, on avait $RG = 100$ ohms, l'appareil indiquerait :

$$I = U/R = 10/100 + 100 = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ MA},$$

c'est-à-dire un courant deux fois plus faible que celui qui circule réellement dans le circuit, lorsque l'appareil de mesure est débranché.

Pour la mesure de TENSION et plus précisément pour la mesure de la tension aux bornes de R2, il est évident que G (galvanomètre) devrait dans le cas idéal avoir une RESISTANCE INTERNE INFINIE. En effet, l'appareil indique la tension aux bornes de l'ensemble R2/RG, RG étant en parallèle sur R2.

EXEMPLE :

Tension = 10 Volts

R1 = 5 Ω

R2 = 5 Ω

RG = infinie

Sans appareil de mesure, la tension aux bornes de R2 est de $U = RI$ avec $I = U/R_1 + R_2$, soit $10/5 + 5 = 1 \text{ A}$, donc :

TENSION AUX BORNES DE R2 : $5 \times 1 = 5 \text{ Volts.}$

Or, en mettant en parallèle sur R2 une résistance de valeur infinie, on ne modifie PRATIQUEMENT PAS la valeur de R2.

Prenons un premier exemple avec $R_G = 1000 \Omega$. Cette valeur est déjà grande par rapport à R2.

L'ensemble R2/RG en parallèle, prend une valeur de :

$$R_{eq} = \frac{R_2 \times R_G}{R_2 + R_G} = \frac{5 \times 1000}{5 + 1000} = 4,8 \Omega \text{ environ,}$$

au lieu de 5Ω avec R2 seule ; la différence est peu importante et la tension indiquée par l'appareil de mesure est sensiblement exacte.

En prenant $R_G = 10000 \Omega$, la précision est encore plus satisfaisante car :

$$R_{eq} = \frac{R_2 \times R_G}{R_2 + R_G} = \frac{5 \times 10000}{5 + 10000} = 4,9 \Omega \text{ environ}$$

valeur pratiquement égale à R2 seule.

Par contre en prenant $R_G = 5 \Omega$, la résistance équivalente de l'ensemble R2/RG est de :

$$\frac{R_2 \times R_G}{R_2 + R_G} = \frac{5 \times 5}{5 + 5} = 2,5 \Omega$$

valeur réduite de moitié par rapport à la valeur de R₂ seule.

Le courant circulant dans le montage est alors de :

$$I = U/R_1 + R_{eq} = 10/5 + 2,5 = 1,3 \text{ A}$$

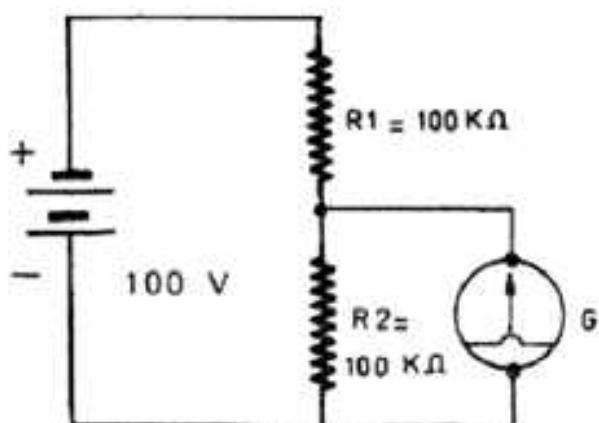
et la TENSION indiquée par l'appareil est de :

$$U = RI = 2,5 \times 1,3 = 3,25 \text{ Volts au lieu de 5 Volts.}$$

Dans cet exemple, nous avons pris intentionnellement des valeurs de résistances assez faibles, mais vous pouvez facilement imaginer ce qui se passe en réalité lorsque les résistances en jeu sont de l'ordre de 100 kΩ et même souvent beaucoup plus.

Prenons un exemple pratique avec des valeurs réelles.

Soit le circuit ci-dessous :



Sans appareil de mesure, la tension aux bornes de R₂ est de 50 Volts, car :

$U = R \cdot I$ avec $I = U/R$ soit :

$$100/100.000 + 100.000 = 0,0005 \text{ A et}$$

$$U = 100.000 \times 0,0005 = 50 \text{ Volts}$$

En branchant sur R₂ un appareil de mesure dont la résistance interne est de 100 Ω par exemple, la résistance de l'ensemble R₂/G est de :

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_2 \times R_G}{R_2 + R_G} = \frac{100 \ 000 \times 100}{100 \ 000 + 100} = 99 \ \Omega \text{ environ}$$

Le courant dans le circuit est alors de :

$$I = U/R = 100/100.000 + 99 = 0,0009 \text{ A}$$

et la tension aux bornes de R₂ de :

$$U = RI = 99 \times 0,0009 = 0,08 \text{ Volts environ.}$$

Ainsi, le branchement de l'instrument de mesure dont la résistance interne est de 100 Ω, détermine une augmentation du courant, qui passe de 0,0005 A à 0,0009 A. Dans ces conditions, la tension indiquée par l'appareil de mesure est de 0,08 Volts alors qu'en réalité elle est de 50 Volts.

CONCLUSION : UN APPAREIL DE MESURE dont la RESISTANCE INTERNE est faible par rapport à la résistance du circuit sur lequel s'effectue la mesure, non seulement n'est pas précis mais le plus souvent ne permet même pas d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur de la tension.

C'est bien le cas dans l'exemple cité : la valeur de la tension est en réalité de 50 Volts et l'appareil indique 0,08 Volt.

- **NOTEZ bien enfin la DIFFERENCE ESSENTIELLE entre la mesure de courant et la mesure de tension en ce qui concerne le BRANCHEMENT DE L'APPAREIL DE MESURE.**

a) **MESURE DE COURANT** : l'appareil est branché en SERIE dans le circuit. Dans tous les cas, cela implique qu'il faut DESSOUDER une liaison, c'est-à-dire effectuer une COUPURE du circuit pour y placer l'appareil de mesure.

b) MESURE DE TENSION : l'appareil est branché en PARALLELE sur le circuit.

Cette mesure peut donc s'effectuer dans tous les cas, facilement rapidement en n'importe quel point d'un montage.

Comparez à ce sujet les figures 5 et 7 de cette leçon.



EXERCICE DE REVISION SUR THEORIE 12

- 1 - Quel effet du courant détermine généralement le fonctionnement d'un galvanomètre ?
- 2 - Qu'entend-on par calibre d'un appareil de mesure ?
- 3 - Qu'est-ce que la résistance interne d'un galvanomètre ?
- 4 - Comment relie-t-on un galvanomètre pour mesurer le courant qui circule dans un circuit ?
- 5 - Comment doit-on procéder pour doubler le calibre d'un galvanomètre pour la mesure du courant ?
- 6 - De quelle façon relie-t-on un voltmètre pour mesurer la tension aux extrémités d'une résistance ?
- 7 - Comment obtient-on la valeur que l'on doit donner à la résistance additionnelle d'un voltmètre ?
- 8 - A quelle extrémité du cadran d'un ohmmètre trouve-t-on le zéro ?



REPONSES A L'EXERCICE DE REVISION SUR "THEORIE 11"

- 1 - Les deux enroulements d'un transformateur s'appellent primaire et secondaire.
- 2 - Un transformateur fonctionne à vide quand son secondaire est ouvert.
- 3 - Un transformateur ne peut pas fonctionner avec le courant continu, il ne fonctionne qu'avec le courant alternatif.
- 4 - Le rapport de transformation d'un transformateur s'obtient en divisant la tension primaire par la tension secondaire.
- 5 - Le rapport de transformation est égal au nombre de spires primaires, divisé par le nombre de spires secondaires.
- 6 - Par primaire universel on entend un primaire muni de prises adaptées à toutes les valeurs possibles de la tension du réseau.
- 7 - Le courant de charge d'un transformateur est le courant fourni à la charge par le secondaire.
- 8 - Le noyau des transformateurs est formé de petites tôles isolées entre elles, pour réduire les pertes de puissances dues aux courants parasites.
- 9 - L'induction est le flux qui traverse chaque centimètre carré de la section d'un noyau ferromagnétique.
- 10 - L'autotransformateur est surtout plus avantageux que le transformateur quand son rapport de transformation est proche de 1.

