

ABC DE L'OSCILLOGRAPHÉ (1)

Par Roger DAMAN, Ingénieur E. S. E.

Notre dernier article a traité de la déviation dans l'oscillographe. Nous avons reconnu qu'on pouvait considérer l'appareil comme un voltmètre d'une nature particulière, mais qui donne une déviation strictement proportionnelle à la tension appliquée.

Nous avons aussi constaté que c'était un instrument relativement peu sensible puisque, pour obtenir une déviation visible du « spot », il faut appliquer une tension supérieure à 10 V entre les plaques de déviation.

Si nous voulons l'utiliser pour observer la forme de tensions de très faible amplitude, il faudra faire appel aux bons offices d'un amplificateur. C'est une question que nous examinerons par la suite.

Quand on applique une tension alternative entre les plaques de déviation, on voit apparaître une ligne verticale. Celle-ci est proportionnelle à la tension appliquée. Mais de quelle tension s'agit-il? TENSION EFFICACE? TENSION DE CRÊTE? TENSION DE CRÊTE A CRÊTE? Nous avons débrouillé tout cela dans notre dernier article.

Il nous faut maintenant préciser quelques particularités de la déviation.

Distorsion d'amplitude ou « trapézoïdale ».

D'après la formule simple qui permet de calculer la déviation dans un oscillographe, le déplacement du « spot » sur l'écran est exactement proportionnelle à la tension appliquée.

Faisons donc, à ce sujet, une expérience. Les plaques de déviation sont connectées comme nous l'indiquons sur la figure 1.

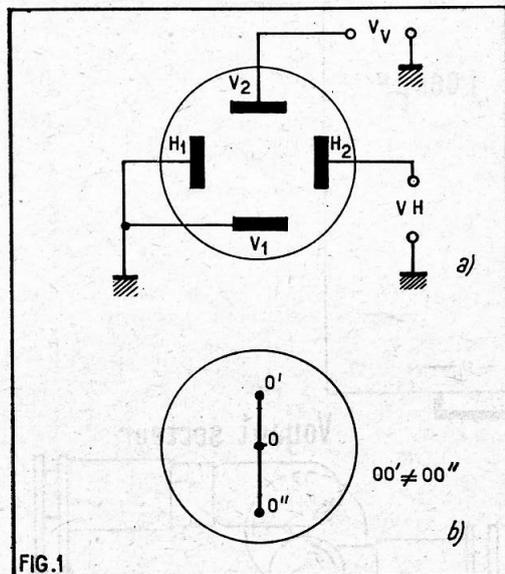


FIG. 1. — a) Le branchement le plus courant des plaques de déviation est conforme à la disposition a.

b) Si l'on applique entre les plaques V1 et V2 la même tension continue on observe que le spot passe de O, en O' par un sens de branchement et de O' en O'' pour l'autre sens. Mais OO' n'est pas égal à OO''. Il y a distorsion.

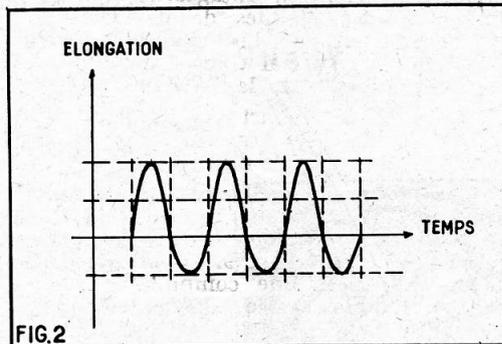


FIG. 2. — La sensibilité de déviation n'étant pas la même pour les deux sens, la sinusoïde est déformée comme l'indique la figure.

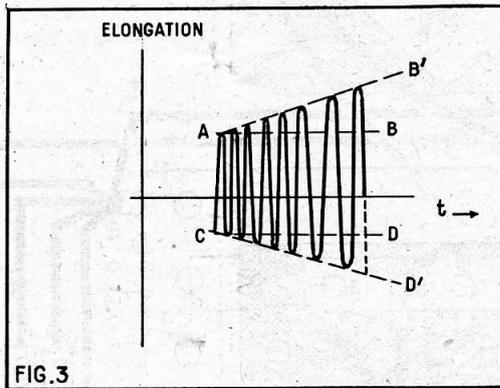


FIG. 3. — La figure d'inscription devrait être le rectangle ABCD. Elle devient AB'D'C qui... à première vue, semble être un trapèze. D'où le nom distorsion trapézoïdale.

Une des plaques verticales et une des plaques horizontales sont reliées entre elles et en même temps à la masse, c'est-à-dire au pôle positif de la source de haute tension.

Les tensions de déviation sont appliquées entre chacune des plaques de déviation et la masse.

Appliquons, par exemple, 40 V dans un sens tel que la plaque de déviation V2 soit positive. On obtiendra alors la déviation OO'. Invertissons cette tension, c'est-à-dire relierons, cette fois, le pôle négatif de la tension à V2. Nous obtiendrons alors la déviation OO''. On peut facilement constater, figure 1, que OO'' est nettement plus long que OO'.

S'il s'agissait d'une tension alternative, et si celle-ci était étalée dans le temps par des moyens que nous exposerons plus loin, on aurait obtenu l'apparence représentée sur la figure 2. Notons d'ailleurs que, sur cette figure, le phénomène a été quelque peu exagéré pour le rendre plus visible.

Pourquoi ce type de distorsion est-il dit « trapézoïdal? » Tout simplement parce que, si l'on part d'un balayage régulier (fig. 3) s'inscrivant normalement dans un rectangle ABCD, on suppose que la distorsion en question transforme la figure d'inscription en un trapèze AB'D'C...

Mais cette supposition est tout à fait gratuite. La distorsion se manifestant dans les deux sens, transforme, en réalité, le

rectangle d'inscription en un quadrilatère oblique AB'D'C (voir fig. 4)... qui n'est pas un trapèze. En effet, par définition un trapèze est un quadrilatère qui présente deux côtés parallèles.

La cause de la distorsion?

Les spécialistes ne sont pas d'accord là-dessus. Ils ont recherché des explications fort savantes, mais pas toujours très convaincantes. Quant à nous, nous avons toujours proposé l'explication suivante qui a l'avantage d'être simple :

La disposition générale des plaques de déviation est représentée (fig. 5). On doit considérer que les plaques de déviation font partie du système optique du tube à rayons cathodiques. Les plaques H1 et V1 demeurent toujours au même potentiel que l'anode puisqu'une connexion directe les relie.

Quand on applique une différence de potentiel alternative d'une valeur de crête de 100 V, le potentiel de la plaque V1 reste fixe par rapport à celui de la cathode, mais celui de la plaque V2 subit des variations de ± 100 V. Cela veut dire qu'il passe de $+800 + 100$ soit 900 V à $+800 - 100$ soit 700 V.

Dans le premier cas, les électrons reçoivent une accélération supplémentaire, et

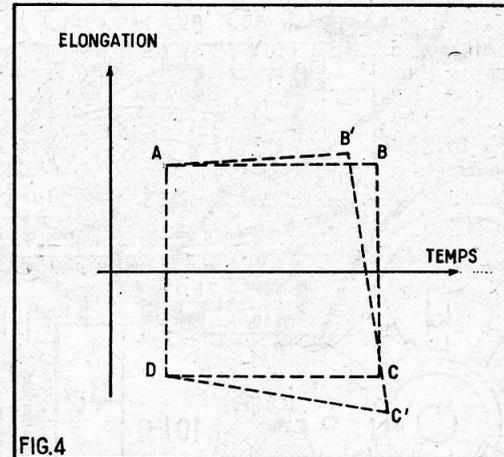


FIG. 4. — En réalité les choses ne se passent pas comme sur la figure 3; le rectangle ABCD devient le quadrilatère oblique AB'D'C... qui n'est pas un trapèze.

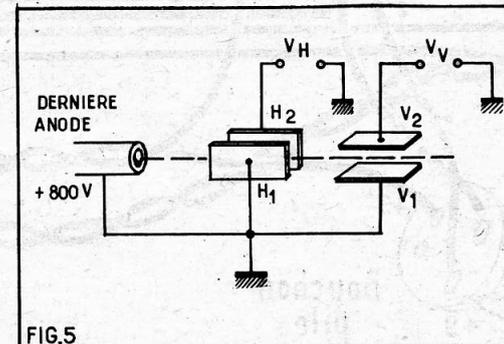


FIG. 5. — Schéma général de branchement d'un système de déviation simple.

(1) Voir les nos 169 et 170 de Radio-Plans.

dans le second cas, ils subissent un freinage. Or, la formule qui permet de calculer l'importance de la déviation fait intervenir la tension d'accélération, c'est-à-dire la vitesse. Il en résulte inéluctablement que, dans le premier cas, la sensibilité est diminuée, alors qu'elle est augmentée dans le second cas. Et cela se traduit nécessairement par une distorsion.

D'une manière plus générale, on pourrait montrer que la cause profonde de ce phénomène est le fait qu'entre un faisceau d'électrons et un champ électrique se produisent nécessairement des échanges d'énergie, même si la force de déviation est, à l'origine, perpendiculaire à la trajectoire.

En effet, sous l'influence de cette force F (fig. 6) les électrons acquièrent une vitesse transversale V_t , ce qui correspond à une certaine énergie cinétique $\frac{1}{2} m V_t^2$. La vitesse,

le long de la trajectoire ou V_r , peut être considérée comme résultant de la composition de la vitesse initiale V_0 avec V_t . Il est bien évident que V_r croît à mesure que les électrons pénètrent davantage entre les deux plaques...

Attaque symétrique des plaques de déviation.

On peut éviter totalement l'inconvénient de la distorsion dite « trapézoïdale » en attaquant symétriquement les plaques de déviation. Le montage de principe est indiqué sur la figure 7. Le potentiel moyen, c'est-à-dire celui de l'anode, est fixé par l'intermédiaire de deux résistances égales R_1 et R_2 . La valeur de ces résistances peut être choisie très grande, de manière à ne pas produire d'amortissement entre les deux bornes d'entrée.

Dans ces conditions, il est certain que le potentiel le long de l'axe optique central OO' demeure absolument invariable au cours du fonctionnement. En effet, si la tension d'une plaque augmente d'une certaine valeur, celle de la plaque symétrique diminue d'une valeur égale. Ainsi le potentiel médian est inchangé.

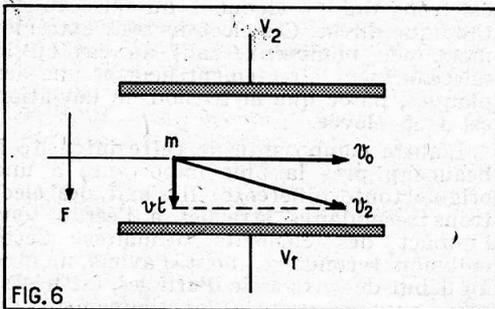


FIG. 6. — En examinant cette figure, on comprend qu'à leur sortie des plaques de déviation les électrons ont une vitesse plus grande qu'à l'entrée. La vitesse initiale V_0 se compose avec la vitesse transversale V_t pour donner la vitesse résultante V_r qui est plus grande que V_0 .

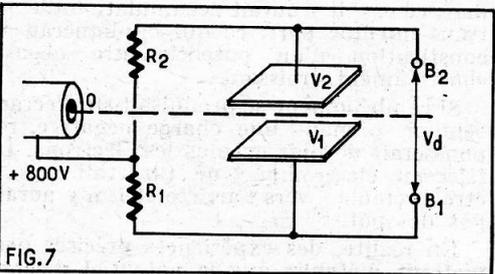


FIG. 7. — On peut éviter la distorsion dite « trapézoïdale » en attaquant symétriquement les plaques de déviation.

Ce procédé est employé dans tous les oscillographes de grande précision. Il complique évidemment sérieusement la réalisation de l'appareil.

Il faut, en effet, que la source du signal appliqué entre les deux bornes B_1 B_2 soit isolée de la masse. Cela ne serait pas le cas d'un amplificateur de schéma courant, comme celui qui est représenté figure 8. Le signal présent au point S n'est disponible qu'entre ce point et la masse et il serait, par conséquent, impossible de l'appliquer entre les bornes B_1 et B_2 .

Pour profiter des avantages de l'attaque symétrique des plaques de déviation, il faudrait passer par l'intermédiaire d'un transformateur spécial comme celui qui a été représenté en b sur la figure 8.

Mais, avec la plupart des signaux qu'il s'agit d'examiner, ce transformateur serait lui-même une cause de distorsion.

La solution la meilleure est l'emploi d'un amplificateur dont la sortie est elle-même symétrique comme celui qui est représenté sur la figure 9. Il est toutefois certain que c'est une complication augmentant notablement le prix de revient de l'oscillographe.

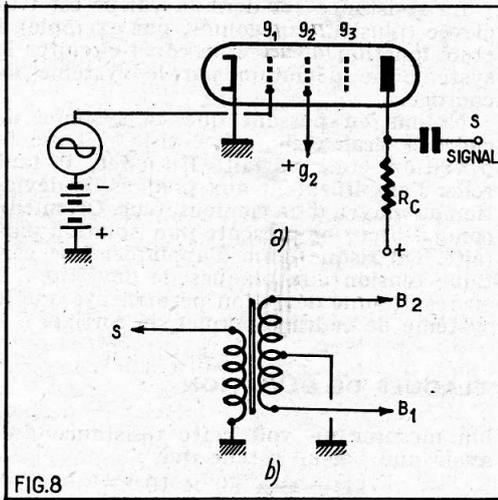


FIG. 8. — Un amplificateur ordinaire, ou à sortie simple, comme en a , ne permet pas l'attaque symétrique des plaques de déviation.

Pour que cela soit possible, il faudrait utiliser un transformateur spécial en b ... En pratique, la réalisation de ce transformateur est souvent impossible.

Déconcentration du faisceau.

En même temps que l'attaque asymétrique des plaques de déviation fait apparaître une distorsion, elle se traduit également par une déconcentration du faisceau. Si le réglage de finesse est réglé pour obtenir un spot bien concentré dans les régions comme A C , etc., on constate que le tracé s'épaissit dans les régions comme B et D (fig. 10 a).

Si, au contraire, on cherche à obtenir la finesse la plus grande en B , on constate un manque de finesse dans toutes les autres régions (fig. 10 b).

Ce phénomène étant dû à des causes qui ont déjà été expliquées plus haut, il peut être évité grâce aux mêmes dispositions, c'est-à-dire au moyen d'une attaque symétrique des plaques de déviation.

Un autre remède.

Quand on entreprend la construction d'un oscillographe simple, il est normal d'hésiter à prévoir un amplificateur symétrique. On le comprendra sans peine quand nous aurons examiné plus loin quelles sont

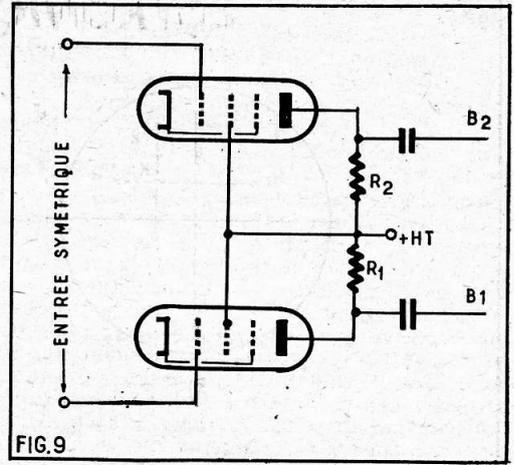


FIG. 9. — Cet amplificateur symétrique ou push-pull permet, l'attaque symétrique des plaques de déviation.

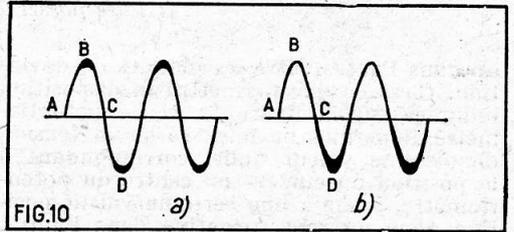


FIG. 10. — La distorsion d'amplitude s'accompagne de phénomènes de déconcentration du spot.

les qualités que doit présenter cet amplificateur.

C'est pour cette raison que les électroniciens ont cherché à remédier à la distorsion tout en utilisant un amplificateur à sortie simple. Différentes solutions ont été trouvées à ce problème.

La meilleure consiste à modifier l'architecture des plaques de déviation pour éviter le mal. Les plaques ne sont plus de simples plans. En somme, on corrige la distorsion au moyen d'une autre distorsion.

Il va sans dire que ces tubes spéciaux doivent être utilisés dans des conditions qui sont précisées par le constructeur. Dans ce cas, on peut considérer que la distorsion d'amplitude est à peu près supprimée. Cet avantage se paie généralement d'une certaine perte de sensibilité.

Cadrage et centrage.

Dans un tube à rayons cathodiques parfait, le « spot » doit être situé au centre C de l'écran quand aucune tension n'est appliquée sur les plaques de déviation. Pour être assuré qu'il en est bien ainsi, il suffit de mettre ces plaques en court-circuit.

Dans la plupart des cas, on pourra observer que le spot n'occupe pas le centre de l'écran. Il se projette, par exemple, en x . Il ne faut pas s'étonner de ce résultat, car il est bien évident que le moindre défaut de centrage au niveau du système de déviation se traduit par un écart notable de la déviation, surtout si la longueur du tube est relativement grande. L'architecture compliquée du canon à électrons et du système de déviation est établie au moyen de tiges de verre frité, et, éventuellement, d'entretoises de mica.

On ne peut absolument pas compter sur une rigueur d'assemblage aussi grande que celle qu'on obtient dans la mécanique de précision.

Mais il est relativement facile de corriger les écarts au moyen de réglages de centrage. En effet, pour déplacer le spot dans un sens ou dans l'autre, il suffit d'appliquer une différence de potentiel dans un sens

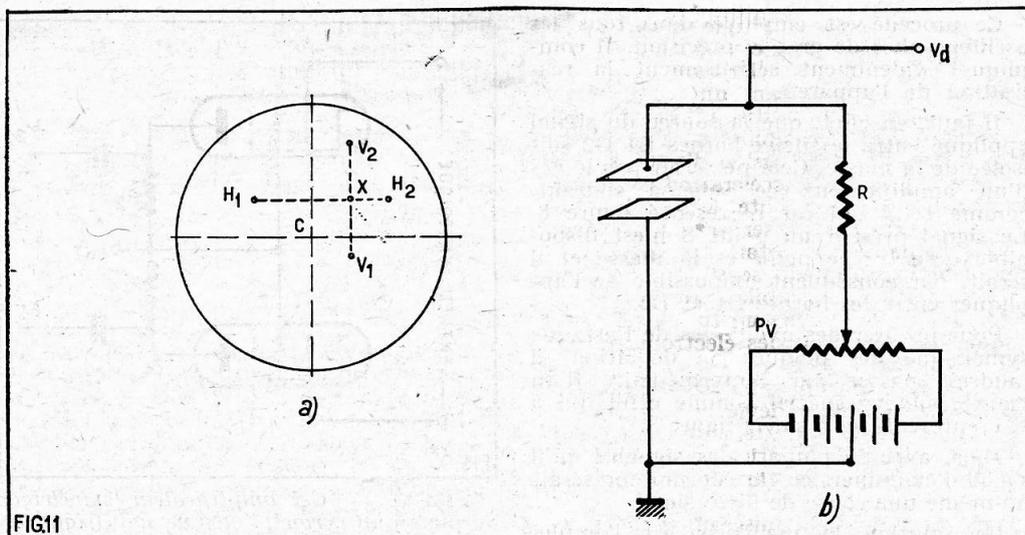


FIG. 11. — a) Principe du centrage ou du cadrage. Le dispositif représenté en b) permet de faire passer le spot de V1 à V2.

ou dans l'autre entre les plaques de déviation. C'est ce que permettra la disposition indiquée sur la figure 11 b. Le potentiomètre P permet de faire varier la tension depuis une valeur nulle, correspondant à la position du curseur au centre du potentiomètre, jusqu'à une certaine valeur positive dans un sens, négative dans l'autre. Ainsi, le spot étant normalement en X quand les plaques sont en court-circuit, la manœuvre du potentiomètre PV permettra de faire passer le spot de V1 à V2. Un système semblable prévu sur les plaques donnant la déviation verticale permettra de faire passer le spot de V1 à V2; et un système semblable prévu sur les plaques donnant la déviation horizontale, permettra de déplacer le « spot » de H2 à H1.

Il est bien évident qu'en combinant les deux réglages, il sera très facile d'amener très exactement le spot au point central C.

La résistance R1 dont la valeur est très élevée (plusieurs mégohms, par exemple) a pour fonction d'éviter de court-circuiter le système de déviation par le système de cadrage.

Notons en passant que ce système de cadrage serait utile, même si le système de déviation était parfait. En effet, il faut relier l'amplificateur aux plaques de déviation au moyen d'un condensateur. Or, aucun condensateur ne présente une isolation parfaite. On risque donc d'appliquer une certaine tension aux plaques de déviation. Il en résulte une déviation permanente que le système de cadrage permet de corriger.

CHARGE IMPOSÉE PAR LES PLAQUES DE DÉVIATION

Le voltmètre.

Nous avons montré plus haut qu'un oscillographe pouvait être considéré comme un voltmètre. En effet, la déviation du « spot » est proportionnelle à la tension appliquée entre les deux plaques.

Un voltmètre à cadre est constitué comme l'indique la figure 12. Il comporte un galvanomètre à cadre mobile (du moins, c'est le cas des voltmètres de qualité) qui dévie d'un angle proportionnel à l'intensité de courant qui le traverse. En série est montée une résistance.

L'appareil est d'autant plus sensible que le galvanomètre fournit une plus grande déviation pour une plus faible intensité de courant. Les appareils modernes de bonne qualité donnent la totalité de leur déviation pour une intensité de courant de $50 \mu\text{A}$ ou $50 \times 10^{-6} \text{ A}$.

Il est facile de calculer la résistance R qui doit être placée en série. Si nous vou-

lon mesurer un volt cette résistance doit avoir une valeur x telle que :

$$1 = x \times 50 \times 10^{-6}$$

c'est-à-dire :

$$x = \frac{150 \times 10^{-6}}{50 \times 10^{-6}} = 20\,000 \Omega$$

On dira de ce voltmètre qu'il présente une sensibilité de $20\,000 \Omega$ par volt. Il est bien certain qu'un voltmètre sera d'autant mieux que sa résistance sera plus élevée pour mesurer une tension donnée. En effet, un voltmètre est, en réalité, un instrument qui *dérive* une certaine intensité. La perturbation qu'il introduira dans un circuit et, par conséquent, les erreurs de mesure dont il sera la cause seront d'autant plus réduites que l'intensité dérivée sera plus faible. Remarquons, en passant, que réciproquement on pourrait montrer qu'un ampèremètre est un instrument qui consomme des volts, de la même manière qu'un voltmètre consomme des ampères...

Pour résumer ce qui précède, on peut dire que la qualité d'un voltmètre se mesure à sa résistance, ou d'une manière plus générale à son *impédance*. La question que nous devons nous poser à propos de l'oscillographe utilisé comme voltmètre est donc la suivante : *quelle est l'impédance équivalente ?*

Impédance d'entrée.

Les deux plaques de déviation se comportent a priori comme les deux armatures d'un condensateur. Quand nous branchons une source de courant alternatif entre deux plaques de déviation, il en résultera donc une certaine intensité de courant. On

sait, en effet, qu'une capacité, si elle bloque radicalement le courant continu, laisse passer le courant alternatif.

On sait que l'impédance d'une capacité est donnée par la relation simple :

$$Z = 1/C\omega$$

avec : $\omega = 6,28 \times f$.

f étant la fréquence.

Dans un tube oscillographique normal, comme le DG7-31 dont nous avons déjà indiqué les caractéristiques, nous constatons que la capacité entre les plaques de déviation est comprise entre 1 et 2 pF. C'est extrêmement faible. Il est facile de calculer que, pour une fréquence de 10 000 Hz, l'impédance d'une capacité de 1 pF est de $16 \text{ M}\Omega$... ce qui est énorme.

Pour une fréquence de 1 MHz, cette impédance est encore de $160\,000 \Omega$. Enfin, pour 200 MHz correspondant aux fréquences de la télévision, cette impédance est encore de 800Ω . Si l'on tient compte qu'on travaille toujours à basse impédance (75Ω) quand il s'agit de fréquences aussi élevées, on peut considérer que ce dernier chiffre est encore considérable.

Le courant d'équilibre.

D'après ce qui précède, on pourrait facilement conclure que l'impédance d'entrée en courant continu est infiniment grande. En effet, les deux plaques de déviation sont parfaitement isolées l'une par rapport à l'autre et un condensateur est un arrêt absolu pour le courant continu...

Toutefois, ne nous hâtons pas trop de conclure. Si nous insérons un micro-ampèremètre sensible en série avec une plaque de déviation nous constaterons le passage d'une certaine intensité de courant continu quand le tube est en fonctionnement... Or, s'il y a passage d'un courant continu, c'est que la résistance en courant continu n'est pas infiniment grande... La conclusion est inévitable.

D'où vient ce courant ? Il peut avoir deux origines. La première, c'est que les plaques de déviation captent au passage, quelques électrons qui proviennent du faisceau cathodique direct. Ces électrons sont extrêmement peu nombreux, sauf au cas où le faisceau vient directement heurter une des plaques, parce que la tension de déviation est trop élevée.

L'autre composante de cette intensité a beaucoup près la plus importante a une origine toute différente. Il s'agit des électrons secondaires arrachés à l'écran sous l'impact des éléments primaires. Cette émission secondaire, nous l'avons montré au début de cette série d'articles, est nécessaire pour assurer le fonctionnement du tube.

Il faut bien, en effet, que le circuit de la cathode se referme d'une manière ou d'une autre. La cathode émet un certain nombre d'électrons par seconde et il faut obligatoirement qu'elle retrouve ce même nombre d'électrons.

Le circuit ne peut pas être ouvert, car, dans ce cas, il y aurait accumulation d'électrons quelque part, ce qui impliquerait la constitution d'un potentiomètre négatif constamment croissant...

Si ce phénomène se produisait sur l'écran, celui-ci, prenant une charge négative, repousserait de plus en plus les électrons. Le faisceau électronique ne tarderait pas à être « refoulé » vers l'arrière et il n'y aurait pas de spot.

En réalité, des expériences précises permettent d'établir que le potentiel d'écran se fixe très rapidement à une valeur très peu différente de celle de l'anode. La différence est, en pratique, de quelques volts.

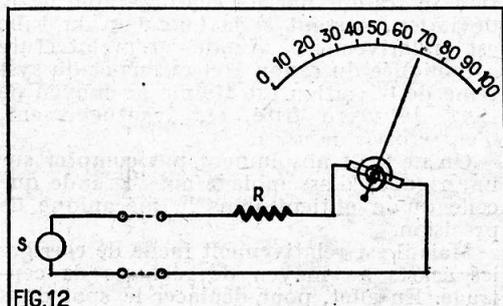


FIG. 12. — Principe du voltmètre à cadre.

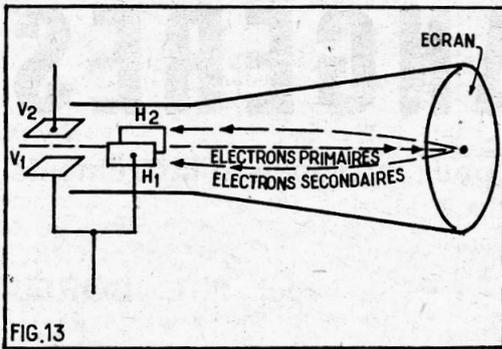


FIG. 13. — Comment fonctionne le tube à rayons cathodiques. Le potentiel d'écran s'équilibre automatiquement à une valeur telle que le nombre d'électrons primaires soit exactement égal au nombre d'électrons secondaires perdus dans le même temps.

Ce potentiel d'équilibre se maintient automatiquement par le jeu des électrons primaires et secondaires. Quand cet équilibre est réalisé — ce qui se produit dans les premières microsecondes du fonctionnement, l'écran reçoit autant d'électrons primaires qu'il perd d'électrons secondaires (fig. 13). Les électrons secondaires diffusent en sens inverse des électrons primaires et sont captés par les premières électrodes positives qu'ils rencontrent en chemin. Ces électrodes sont précisément les plaques de déviation. On peut d'ailleurs facilement vérifier que, si la disposition est celle que nous

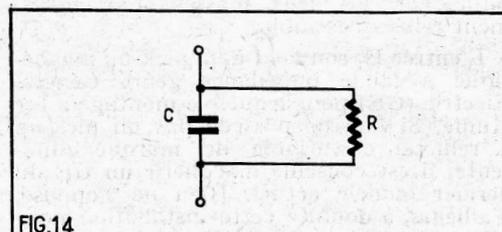


FIG. 14. — Schéma équivalent de l'impédance offerte par les plaques de déviation.

avons représentée sur la figure 13 n, l'intensité d'équilibre est beaucoup plus importante pour les plaques H1 H2 que pour les plaques V1 V2.

De tout cela, on peut conclure qu'il serait faux de considérer que les plaques de déviation présentent tout simplement une réactance de capacité. Il faut ajouter à cela une résistance purement ohmique. Si bien qu'en définitive, le schéma équivalent doit comporter les deux éléments. On peut donc le représenter comme nous l'avons fait sur la figure 14.

La valeur de R sera beaucoup plus importante pour les plaques V1 V2. C'est donc entre ces plaques que sera appliquée la tension que nous voulons soumettre à l'appareil. Les deux plaques H1 et H2 serviront au balayage, ainsi que nous l'examinerons par la suite. Et, dans ce cas, il n'y a aucun inconvénient si l'impédance équivalente est plus faible.

Tubes à forte accélération.

La brillance du « spot » sur l'écran dépend de deux facteurs :

- a) Intensité du faisceau.
- b) Vitesse des électrons.

On peut augmenter l'intensité du faisceau en réduisant la tension négative appliquée au cylindre de Wehnelt, ou grille). Mais en même temps qu'on augmente le nombre d'électrons, on diminue la finesse du « spot ». Il est impossible qu'il en soit autrement.

En conséquence, pour obtenir sur l'écran un tracé à la fois très fin et très brillant, il

n'est d'autre ressource que d'augmenter la vitesse des électrons, c'est-à-dire, en pratique, la tension d'accélération.

Malheureusement, dans un tube oscillographique, c'est-à-dire utilisant la déviation électrostatique, la sensibilité est strictement proportionnelle à la tension d'accélération. Doubler la tension d'accélération c'est diviser par deux la sensibilité. Or, nous avons déjà eu l'occasion d'observer qu'un tube à rayons cathodiques n'était pas un instrument particulièrement sensible.

Cette perte de sensibilité vient évidemment du fait que, dans un tube oscillographique, l'accélération des électrons précède leur déviation.

Ne serait-il pas possible d'accélérer les électrons après avoir dévié le faisceau ?

C'est, en effet, parfaitement possible — et la réponse à la question précédente est pratiquement donnée par les tubes dits à « post-accélération ».

Dans ces tubes, le faisceau est accéléré une première fois modérément dans le ca-

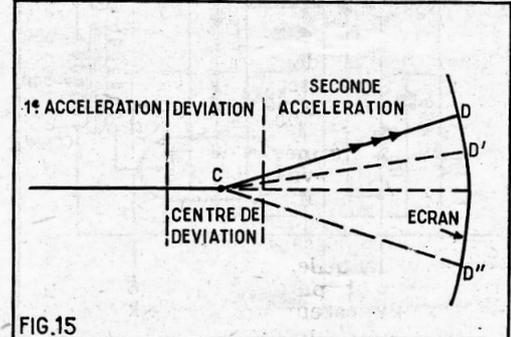


FIG. 15. — Principe des tubes à forte accélération.

non à électrons. Après quoi, il est dévié, comme dans un tube normal. Ensuite, après leur sortie des plaques de déviation, les électrons soumis à l'action d'électrodes spéciales, subissent une nouvelle accélération.

Tout cela correspond à la disposition schématique représentée sur la figure 15.

Forme du champ post-accélérateur.

Après déviation, la direction du faisceau est CD, en l'absence de champ post-accélérateur. Si nous voulons que la déviation demeure la même après l'opération, il faut évidemment que la force exercée par la tension de post-accélération soit dirigée précisément selon CD. Si la déviation était CD' ou CD'' il faudrait de la même manière que les forces de post-accélération s'exercent selon CD' et CD''.

Si l'on considère que la déviation s'effectue à partir d'un centre de déviation C ; il faut que les lignes de forces du champ post-

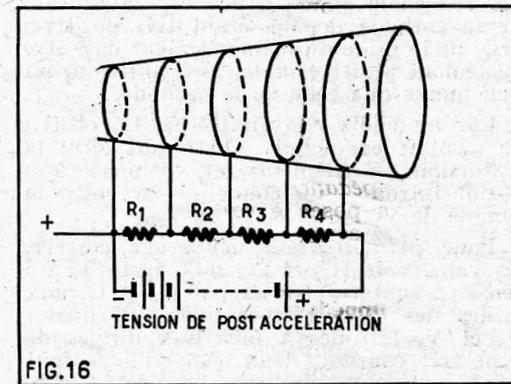


FIG. 16. — Disposition théorique des électrodes de forte accélération. En pratique, le nombre des anneaux conducteurs est réduit à 1 ou 2.

accélérateur viennent passer par ce même point. On montrerait que les surfaces équipotentielles qui produisent le champ soient des sphères admettant C comme centre.

Il est évident que l'intersection de ces sphères avec le cône de verre du tube à rayons cathodiques correspond à des circonférences.

On peut donc réaliser un dispositif comme celui qui a été représenté sur la figure 16. Si les tensions sont judicieusement réparties le long du potentiomètre, il n'y aura aucune modification de sensibilité. Les anneaux peuvent être réalisés en graphite ou au moyen d'un revêtement métallique. Pour que le résultat soit parfait, il faudrait un nombre d'anneaux infiniment grand. En pratique on réduit le nombre des anneaux à 2... parfois même à un seul. Le résultat n'est alors pas parfait et l'on constate que la post-accélération se traduit par une modification de la sensibilité du tube.

ESSAI GRATUIT

J'ai compris

LA RADIO ET LA TÉLÉVISION
grâce à
L'ÉCOLE PRATIQUE D'ÉLECTRONIQUE

Sans quitter votre occupation actuelle et en y consacrant 1 ou 2 heures par jour, apprenez la RADIO qui vous conduira rapidement à une brillante situation. Vous apprendrez Montage, Construction et Dépannage de tous les postes. Vous recevrez un matériel ultra moderne : Transistors, Circuits imprimés et Appareils de mesures les plus perfectionnés qui resteront votre propriété. Sans aucun engagement, sans rien payer d'avance, demandez la

première leçon gratuite!

Si vous êtes satisfait vous ferez plus tard des versements minimaux de 12.50 N.F. à la cadence que vous choisirez vous-même. A tout moment vous pourrez arrêter vos études sans aucune formalité.

Notre enseignement est à la portée de tous et notre méthode vous émerveillera l...

ÉCOLE PRATIQUE D'ÉLECTRONIQUE
Radio - Télévision
11, Rue du Quatre-Septembre
PARIS (2^e)