

17 – LES PONTS

(Suite voir N° 1557)

DANS l'article précédent nous avons décrit les montages en pont de configuration traditionnelle, c'est-à-dire dont les quatre branches sont parfaitement différenciées. Cette structure permet d'établir une échelle de 1 à 10 linéaire, sur chaque gamme, avec une très bonne précision.

Pour élargir l'échelle de mesure et simplifier la réalisation tout en conservant une précision acceptable, nous proposons dans cet article la structure dite en pont de comparaison.

Nous en rappellerons le principe, donnerons des indications précises pour réaliser les graduations et décrirons un certain nombre de réalisations pratiques dans cette configuration dont nous indiquerons les applications les plus courantes.

Nous attirons l'attention du lecteur sur l'importance du choix des composants du pont, et, en particulier, du potentiomètre de mesure, qui doivent être de toute première qualité. Les performances obtenues en précision et en stabilité sont directement liées à ce choix. Les indications données en ce domaine dans le précédent article sont à consulter attentivement.

PRINCIPE DU PONT DE COMPARAISON

Le pont de comparaison, ainsi nommé car il est souvent utilisé pour comparer les valeurs de deux impédances, est présenté sur la figure 1. Il comporte un potentiomètre linéaire dont les deux portions de résistance R_1 et R_2 , sépa-

rées par le curseur, constituent les deux branches d'un pont classique (fig. 1 a).

Comme la somme des résistances $R_1 + R_2$ demeure constante, la manœuvre du curseur du potentiomètre entraîne une double action : l'augmentation de R_1 en même temps que la diminution de R_2 ou l'inverse.

En établissant un parallèle avec la structure classique, dans laquelle R_1 variait alors

que R_2 restait constant, on met en évidence une action plus énergique de la commande qui permettra d'augmenter l'échelle de mesure jusqu'au rapport 1 à 100.

Si l'on dispose, comme l'indique la figure, une impédance Z de valeur connue dans la branche supérieure droite du pont, alimenté par le générateur G , on pourra obtenir la valeur Z_x inconnue en réglant le potentiomètre jusqu'à l'obtention d'une annulation de tension observée sur le mesureur M . A ce point du réglage correspondront deux valeurs de résistance R_1 et R_2 , de sorte que :

$$Z_x = Z \frac{R_1}{R_2}$$

Il suffit donc de graduer le potentiomètre en valeurs du rapport R_1/R_2 pour obtenir directement la valeur de Z_x .

Suivant que Z correspond à une résistance, une inductance ou un condensateur, on obtiendra respectivement les valeurs suivantes :

$$\text{— pour } Z = \rho \quad R_x = \rho \frac{R_1}{R_2}$$

$$\text{— pour } Z = \rho\omega \quad L_x = \lambda \frac{R_1}{R_2}$$

$$\text{Pour } Z = \frac{1}{\gamma\omega} \quad C_x = \gamma \frac{R_2}{R_1}$$

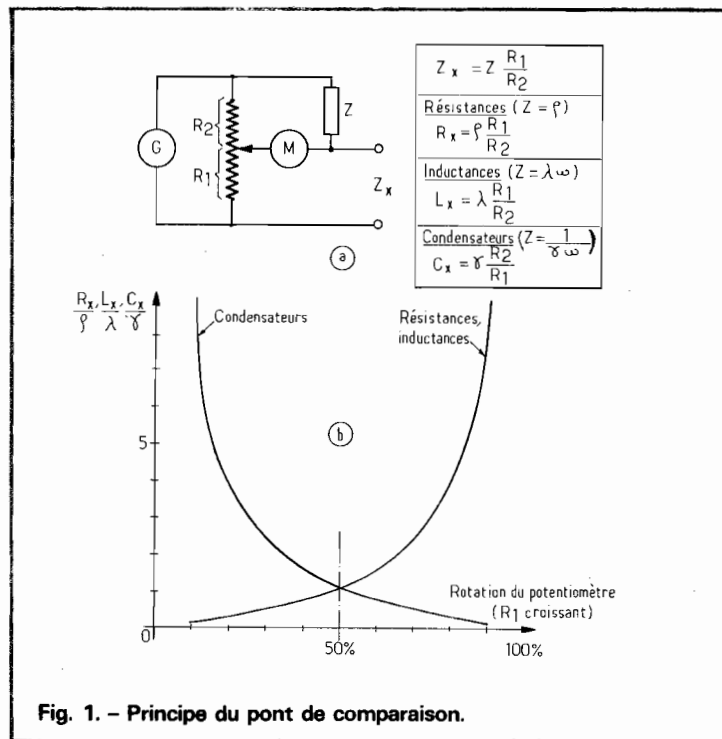
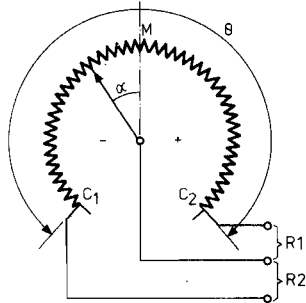


Fig. 1. – Principe du pont de comparaison.



$$R_1 + R_2 = \text{Constante} = P$$

$$R_1/R_2 = Y \text{ d'où}$$

$$R_1 = P \frac{Y}{Y+1}$$

Fig. 2. - Tableau d'étalonnage du potentiomètre.

γ	$R_1 \times P$ k Ω	$\alpha \times \theta / 300$ degrés
0,1	0,091	- 122,7
0,2	1,167	- 100
0,3	0,231	- 80,7
0,4	0,286	- 64,2
0,5	0,333	- 50,1
0,6	0,375	- 37,5
0,7	0,412	- 26,4
0,75	0,428	- 21,6
0,8	0,444	- 16,8
0,85	0,459	- 12,3
0,9	0,474	- 7,8
0,95	0,487	- 3,9
1	0,500	0

γ	$R_1 \times P$ k Ω	$\alpha \times \theta / 300$ degrés
1	0,500	0
1,1	0,524	7,2
1,2	0,545	13,5
1,3	0,565	19,5
1,4	0,583	24,9
1,5	0,600	30
2	0,667	50,1
2,5	0,714	64,2
3	0,750	75
3,5	0,778	83,4
4	0,800	90
4,5	0,818	96,4
5	0,833	100
6	0,857	107,1
7	0,875	112,5
8	0,889	116,7
9	0,900	120
10	0,910	123

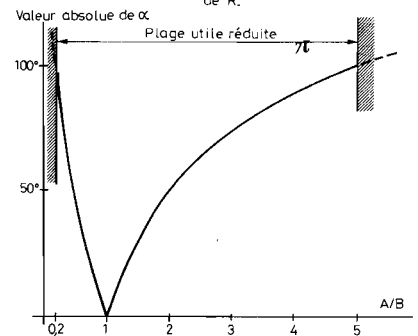
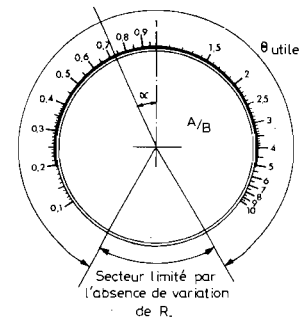


Fig. 3. - Détermination de la plage utile réduite.

On notera, dans ce dernier cas, l'inversion du rapport de comparaison.

Ayant sensiblement les mêmes propriétés qu'un pont classique, le pont de comparaison est plus simple, plus économique et possède une échelle plus étendue.

Malheureusement cet avantage se solde par quelques inconvénients :

- l'augmentation du nombre de points de mesure diminue la précision de la lecture,
- la graduation n'est plus linéaire de sorte que la variation relative de valeur correspondant à un secteur déterminé du potentiomètre, dépend de la position du curseur.

La figure 1 b permet de se rendre compte de l'importance de la non linéarité. C'est ainsi que la moitié de la variation du potentiomètre couvre un rapport de 0,1 à 1 alors qu'à l'autre moitié correspond un rapport de 1 à 10.

MÉTHODES DE GRADUATION

Les figures de cet article présentent des dessins de graduations qui ne sauraient s'appliquer à tous les cas et qu'il est donc inutile de repro-

duire : pour chaque modèle de potentiomètre il conviendra de réaliser des graduations particulières, suivant l'une des méthodes que nous indiquons ci-après.

Si la linéarité du potentiomètre bobiné n'est pas connue, on opérera par comparaison de valeurs en utilisant, par exemple, un lot de 11 résistances à 1 % de même valeur que celle du potentiomètre. En combinant ces résistances en série ou en parallèle, on obtiendra suffisamment de points entre 0,1 et 10 pour que l'on puisse terminer l'étalonnage des graduations par extrapolation.

En utilisant un potentiomètre de classe, dont la linéarité est garantie à mieux que 1 %, ce qui est préférable pour tirer le maximum de profits de ce montage, on pourra réaliser un étalonnage très précis en utilisant un simple rapporteur d'angle et la méthode illustrée sur la figure 2.

Préalablement, il conviendra de connaître la variation totale utile de résistance et l'angle de rotation correspondant à cette variation. Ces paramètres sont, en général, fournis par le constructeur mais peuvent être déterminés expérimentalement.

Soit $P = R_1 + R_2$ la valeur

ohmique du potentiomètre et $Y = R_1/R_2$ le rapport des résistances correspondant à une position particulière du curseur.

Le repère plus important est le point milieu M correspondant à $R_1 = R_2$ qui est très facile à déterminer expérimentalement. L'angle α définit la position du curseur par rapport au point central M.

Les points C_1 et C_2 sont les points extrêmes de variation du curseur entre lesquels existe une résistance de valeur P. On notera que les butées mécaniques du curseur peuvent aller au-delà des limites C_1 et C_2 . L'angle utile de variation est θ .

Connaissant P et θ , il est facile et significatif pour un potentiomètre très linéaire de déterminer la résistance par degré, ou l'angle par ohm, qui permettront d'établir l'étalonnage suivant le tableau de la figure 2 donnant α en fonction de Y. On a indiqué également la valeur de R_1 pour chaque point de façon à faire une éventuelle vérification expérimentale de l'étalonnage.

Les chiffres figurant sur le tableau ont été établis pour une valeur de $P_0 = 1\ 000\ \Omega$ et une variation angulaire utile $\theta_0 = 300^\circ$, mais il est facile de déterminer α correspon-

dant à n'importe quelle valeur de θ .

Ainsi, par exemple, si $\theta = 320^\circ$ et $P = 1\ 500\ \Omega$ on trouverait, pour $Y = 3$:

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\theta}{300} = 75 \cdot \frac{320}{300} = 80^\circ$$

$$\text{et } R_1 = (R_1) \text{ o } x P_0 = 0,750 \cdot 1\ 500 = 1\ 125\ \Omega$$

RÉDUCTION DE LA PLAGE DE MESURE

On a représenté sur la figure 3 un exemple de graduation établi pour un rapport A/B allant de 0,1 à 10. On peut y voir que les graduations sont de plus en plus resserrées au fur et à mesure que A/B croît, de sorte que le secteur compris entre 0,1 et 0,2 et surtout celui compris entre 5 et 10 ne permettent guère une mesure très précise. Il est donc conseillé de limiter la plage de mesure aux valeurs comprises entre 0,2 et 5 représentant un rapport de variation de 25, ce qui n'est déjà pas si mal puisque cela représente 2,5 fois l'échelle utilisée sur un pont de structure conventionnelle.

Bien entendu, ces conclusions ne s'appliquent qu'aux

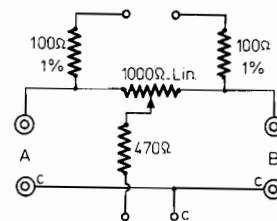
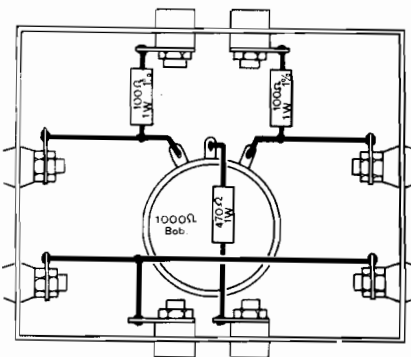
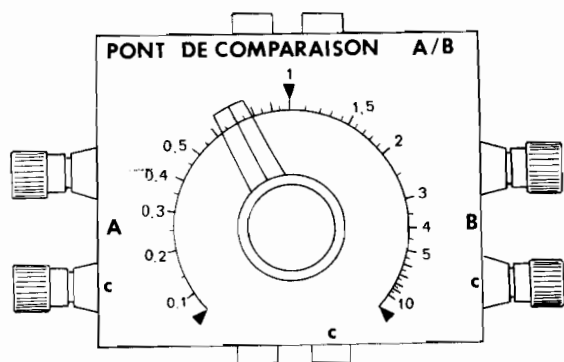


Fig. 4. Pont de comparaison à tout faire.

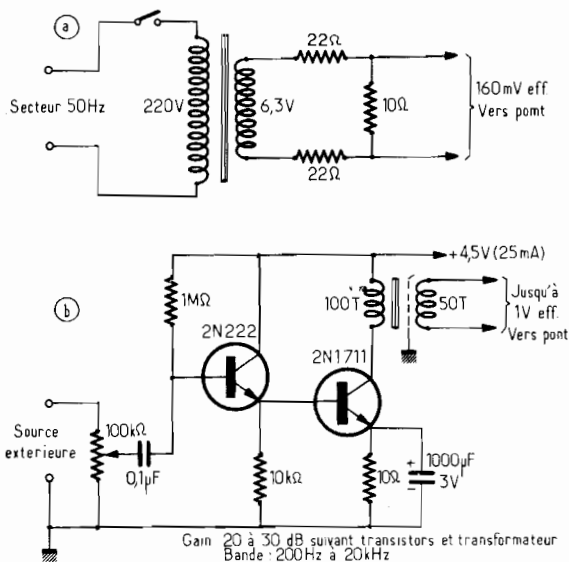


Fig. 5. - Sources de tension alternative.

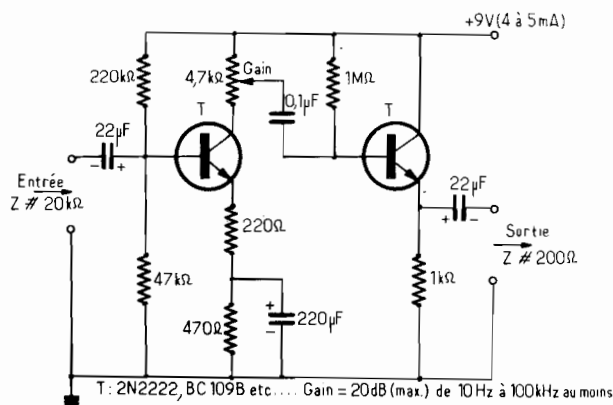


Fig. 6. - Petit amplificateur (pour écoute au casque ou attaque d'un voltmètre alternatif).

cas des ponts de mesure précise de valeur absolue d'impédance, pour lesquels la commutation de gammes devrait tenir compte des recouvrements résultant de la limitation de plage.

Dans tous les cas, nous recommandons cependant de graduer complètement l'échelle 0,1 à 10 de façon à pouvoir apprécier une valeur qui se trouverait aux extrémités d'une plage éventuellement réduite.

PREMIÈRE APPLICATION : UN PONT DE COMPARAISON « À TOUT FAIRE »

Partant des principes établis dans les précédents paragraphes, nous proposons la

réalisation d'un pont de comparaison passif, d'usage général, facile et économique à réaliser, qui pourra être alimenté en alternatif ou en continu.

On en trouvera la description sur la figure 4.

L'organe essentiel est évidemment le potentiomètre de 1 000 Ω. L'étalonnage sera réalisé avec autant de soin que possible suivant les recommandations indiquées plus haut.

L'ensemble est logé dans un coffret métallique de 100 x 80 x 50 mm. Les entrées de mesure A et B sont constituées par des bornes universelles prévues pour fiches bananes ou serrage énergique de connexion. Les entrées « diagonales » sont de simples prises pour fiches bananes montées sur canons isolants. Les fiches marquées c (commun) sont réunies entre elles.

Comme ce petit appareil ne

possède pas son alimentation, nous avons prévu des résistances de protection (2 de 100 Ω et 1 de 470 Ω) afin d'éviter les effets d'excès de courant dans le mesureur, les éléments A et B ou dans une partie de piste du potentiomètre.

Le câblage est extrêmement dépouillé. On le réalisera en fil de forte section afin de limiter les résistances parasites.

L'utilisation pratique de ce pont nécessite une source et un mesureur extérieurs. Ces éléments, dans le cas le plus simple du pont de Wheatstone, seront constitués par une pile et un galvanomètre à zéro central ou un simple multimètre.

Dans le cas le plus général où le fonctionnement en alternatif est requis, on fera appel à un générateur 1 000 Hz symétrique comme celui que nous avons décrit pour le

pont RC de l'article précédent. Plus simplement, on pourra utiliser un transformateur d'alimentation secteur délivrant 6,3 V eff. au secondaire et quelques résistances (voir fig. 5 a). On obtiendra ainsi une tension symétrique d'environ 1 200 mV eff à 50 Hz.

Si l'on désire, pour la commodité de la mesure alimenter le pont avec un générateur audio-fréquence extérieur, par exemple pour faire varier la fréquence, il est possible d'obtenir une symétrisation au moyen d'un petit amplificateur comme celui de la figure 5 b qui permettra de surcroît d'abaisser l'impédance de la source. Il comporte un étage à émetteur follower en liaison directe avec l'étage de sortie dont la charge de collecteur est constituée par le primaire d'un petit transformateur de rapport 2/1.

Si on ne dispose pas d'un tel composant, on pourra le réaliser soi-même sur une carcasse de récupération comportant un circuit magnétique de transformateur AF dont les dimensions pourraient être approximativement 25 x 30 x 8 mm. On bobinera 100 tours de 25/100 au primaire et 50 tours de même fil au secondaire. Un écran électrostatique sera disposé entre le primaire et le secondaire suivant la technique habituelle.

Le gain et la bande passante obtenus avec ce petit montage (tension de sortie voisine de 1 V eff) dépendent beaucoup du transformateur particulièrement vers les fréquences les plus basses.

La détection de l'équilibre sera, en alternatif, appréciée au moyen d'un millivoltmètre amplificateur comme celui que nous avons décrit dans l'article précédent qui conviendrait tout à fait.

Plus simplement, on pourra utiliser un multimètre branché en voltmètre alternatif, mais, dans la plupart des cas, la sensibilité risque d'être insuffisante.

Il est possible de rendre la détection plus facile par une augmentation de niveau. L'amplificateur de la figure 6 procurera un gain de 20 dB dans une large plage de fréquences. La sensibilité sera excellente avec un casque ou un oscilloscope particulièrement entre 400 et 2 000 Hz. Mais on pourra également faire appel au multimètre (V alternatif) dans ce cas.

En 7 a et 7 b figurent respectivement les montages des ponts de Wheatstone et de Sauty déjà cités et à propos desquels il n'y a pas d'observations particulières à formuler si ce n'est que dans ce dernier cas, le condensateur de référence se situe en A et non en B et que l'on peut appliquer, le cas échéant, une polarisation continue.

Le montage de la figure 7 c est particulièrement intéressant puisqu'il permet de comparer deux transistors ou deux diodes, ou encore de comparer l'un ou l'autre de ces semi-conducteurs à une résistance. Pour des transistors PNP, on inversera la polarité de la source. On peut même comparer les transistors d'une paire complémentaire en inversant le branchement du transistor PNP.

Les mesures sur inductances se feront conformément au premier montage de la figure 7 d. Les deux autres montages indiquent la façon de mesurer un rapport de transformation (ou d'auto-transformation), pour le cas où ce rapport est inférieur à 10. On notera que pour le montage du centre, il est nécessaire de respecter un sens de branchement particulier.

En 7 e, on peut effectuer un certain nombre de mesures sur des enceintes acoustiques et, notamment, la comparaison de leur impédance dans la gamme de 20 Hz à 20 kHz, en utilisant un générateur extérieur. Cette mesure permettra de mettre en évidence une éventuelle dissymétrie entre voies sur tout ou partie du spectre audible.

En 7 f, enfin, le montage se prête particulièrement à la comparaison de deux fréquences par la méthode des battements. Le potentiomètre du pont ne sert qu'à équilibrer les niveaux des deux sources pour permettre une détection aisée du battement.

En plus de ces applications

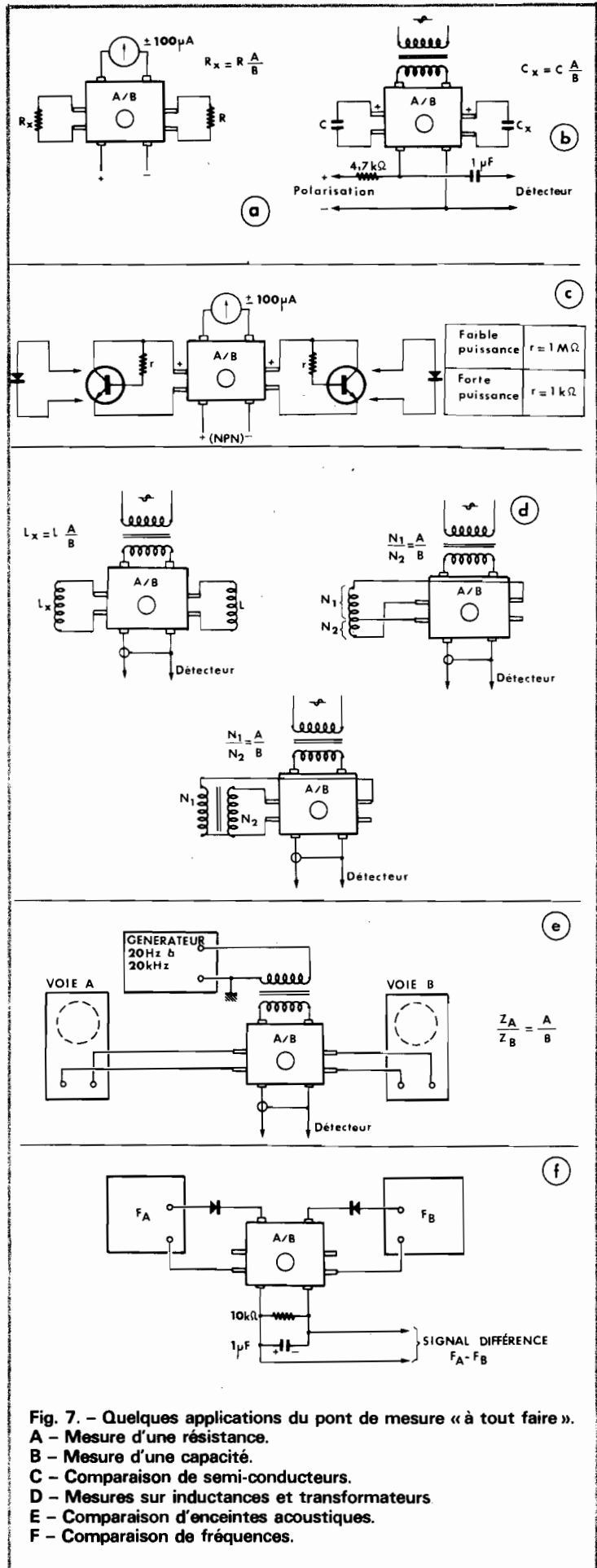


Fig. 7. - Quelques applications du pont de mesure « à tout faire ».
 A - Mesure d'une résistance.
 B - Mesure d'une capacité.
 C - Comparaison de semi-conducteurs.
 D - Mesures sur inductances et transformateurs
 E - Comparaison d'enceintes acoustiques.
 F - Comparaison de fréquences.

APPLICATIONS DU PONT DE COMPARAISON

Nous avons groupé, sur la figure 7, quelques-unes des applications les plus typiques du pont de comparaison.

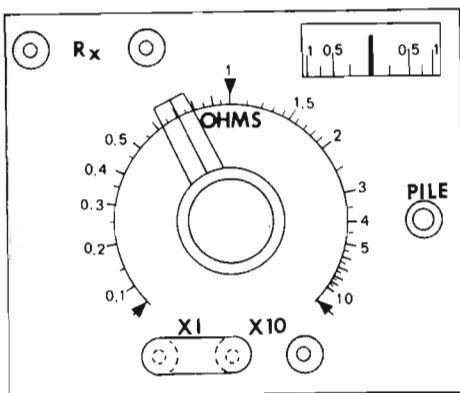


Fig. 8a

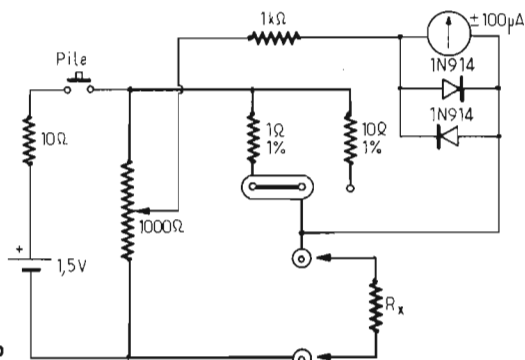


Fig. 8b

Fig. 8. - Réalisation d'un ohmmètre à pont de comparaison pour la mesure de résistances de faibles valeurs.

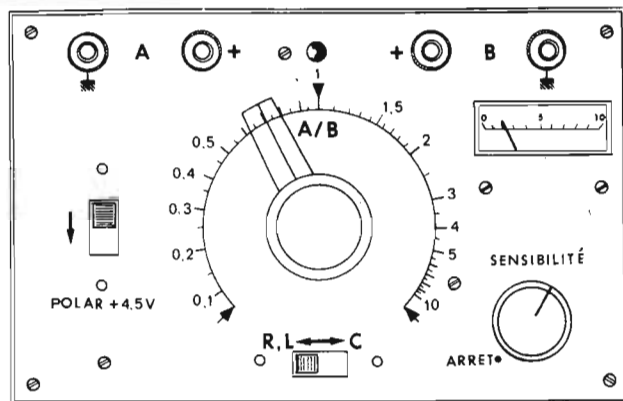


Fig. 9a

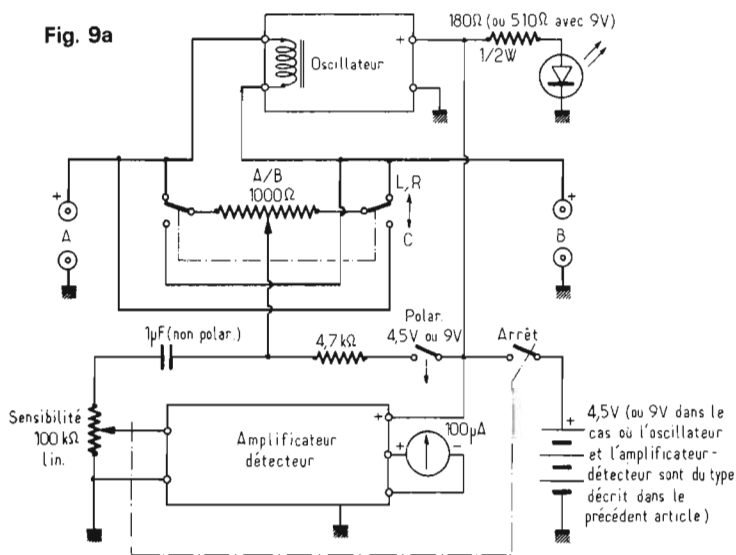


Fig. 9b

Fig. 9. - Pont de comparaison équipé.

typiques, il en existe bien d'autres : on peut constituer un filtre, un atténuateur variable, comparer les tensions de sortie de chaque voie d'un amplificateur stéréophonique, comparer les étalonnages de deux galvanomètres, etc. Ce petit montage est vraiment le type même de l'appareil très utile mais trop simple pour que les constructeurs l'aient commercialisé sous cette forme.

UN OHMMÈTRE POUR DE FAIBLES VALEURS DE RÉSISTANCES

Sur le même principe est bâti l'ohmmètre décrit sur la figure 8.

Il comporte une alimentation par pile de 1,5 V (type R₁₄

ou R₂₀) et un petit galvanomètre de $\pm 100 \mu A$ à zéro central pour détecter l'équilibre.

La résistance de référence peut être 1 Ω ou 10 Ω (1 %), suivant la position du cavalier X₁ - X₁₀. La résistance de 10 Ω en série dans le circuit d'alimentation, une autre résistance de 1 000 Ω et une paire de diodes tête-bêche dans le circuit du mesureur, sont destinés à prévenir les conséquences d'une fausse manœuvre.

On veillera à utiliser des connexions de forte section sur la partie du schéma qui comporte des traits larges.

Le cavalier de commutation fera l'objet d'un soin particulier afin que les résistances de contact soient très faibles. Les bornes de mesure sont universelles, à serrage.

Si toutes ces précautions sont prises, on mesurera facilement des résistances de

0,1 Ω à 10 Ω sur la première gamme, et de 1 Ω à 100 Ω sur la seconde. Cette « couverture basse » sera particulièrement appréciée pour les travaux de vérification des installations électriques, le contrôle des appareils Hi-Fi (résistances des enceintes, des lignes, des charges d'émetteurs, etc), la vérification des résistances de contact des relais, contacteurs, commutateurs, les résistances des enroulements d'un moteur ou d'un transformateur, etc.

PONT DE COMPARAISON UNIVERSEL ALIMENTÉ EN ALTERNATIF

L'appareil présenté sur la figure 9 est auto-alimenté en alternatif à partir d'une simple

pile plate de 4,5 V qui fournit de l'énergie à un oscillateur et un amplificateur-détecteur. Comme le précédent c'est un appareil autonome.

Le schéma de principe, classique, offre toutefois quelques originalités :

- l'inversion des bornes de mesure A et B qui permet, sans difficulté, d'obtenir un rapport de résistances d'inductances ou de capacités, sur les mêmes graduations,
- la mise en service éventuelle d'une polarisation de 4,5 V qui permettra de faire des mesures sur des condensateurs chimiques dans des conditions réalistes.

Le réglage de la sensibilité peut être utilisé pour étalonner le micro-ampèremètre en % d'écart, ce qui sera particulièrement apprécié pour le tri de composants.

Le tarage est simple : après avoir obtenu l'équilibre au

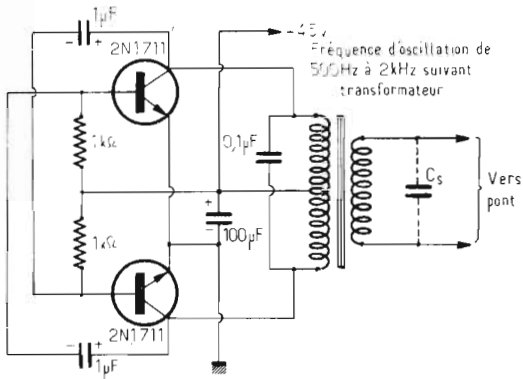


Fig. 10a

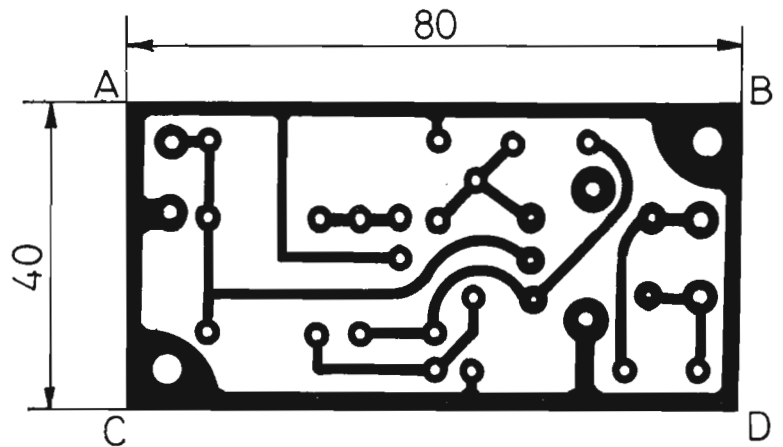


Fig. 10b

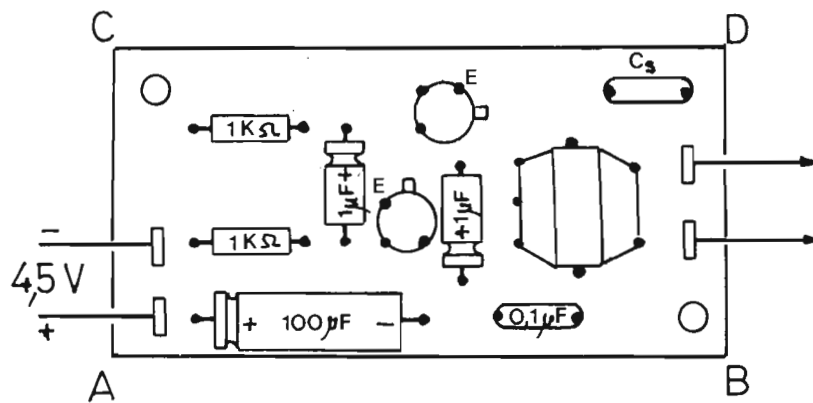


Fig. 10c

Fig. 10. - Réalisation de l'oscillateur du pont.

moyen de deux résistances A et B identiques, on décalera le potentiomètre de façon à avoir un écart de 10 % (curseur sur 1,1). La déviation du micro-ampèremètre sera alors réglée, par le bouton « sensibilité », pour obtenir une lecture à pleine échelle soient 10 divisions. On replace alors le curseur de réglage sur la position 1. Chaque fois que l'on remplacera l'une des résistances A ou B par une valeur à trier, on lira directement sur le micro-ampèremètre, l'écart en %.

Cet étalonnage pourra être assez précis si l'on utilise en amplificateur-détecteur celui que nous avons décrit dans l'article précédent puisque ses indications étaient linéaires. L'amplificateur détecteur que nous présentons sur la figure 11 est moins perfectionné, il est plus simple et donnera des indications de % approximatives sur les faibles écarts (inférieurs à 3 %). Le seul reproche que l'on puisse faire à ce sys-

tème est qu'il n'indique que la valeur absolue mais non pas le sens du décalage.

L'oscillateur simplifié retenu pour notre pont universel fait appel à un transformateur de sortie de récepteur radio miniature (récupération). Le schéma de la figure 10 indique le montage à réaliser en utilisant deux transistors 2N1711. L'oscillation, très facilement obtenue, est proche du signal rectangulaire et pourrait être utilisée telle quelle. On limitera cependant le niveau des harmoniques, pour faciliter le réglage d'équilibre du pont avec des réactances. Pour cela, on disposera au primaire un condensateur de $0,1 \mu\text{F}$ et un autre au secondaire dont la valeur serait à déterminer expérimentalement à l'oscilloscope, si on en a un à sa disposition, sinon on se contentera de 22 nF . L'ensemble peut être monté sur un petit circuit imprimé de $40 \times 80 \text{ mm}$.

L'amplificateur détecteur

de la figure 11 ne fait appel qu'à deux transistors montés en liaison directe et un pont de diodes pour alimenter un galvanomètre de $100 \mu\text{A}$. La sensibilité maximale atteint tout de même 3 mV eff. à pleine échelle en utilisant des NPN à grand gain. Un strap a été ménagé entre la sortie de l'amplificateur et le pont de diodes afin de pouvoir brancher, si on le désire, un appareil de détection extérieur (casque, par exemple). La diode silicium et la résistance de 1000Ω dans le circuit de détection sont destinés à protéger le cadre du galvanomètre. On notera que la bande passante est assez confortable puisqu'elle s'étend à 300 kHz , ce qui dépasse largement, par ailleurs, les possibilités du pont. Le circuit imprimé est un peu plus long que le précédent puisqu'il mesure $90 \times 40 \text{ mm}$.

Les avantages communs à ces deux circuits simplifiés sont leur faible coût, la modi-

cité de leur alimentation et la facilité de réalisation.

La réalisation du pont de comparaison lui-même ne présente guère de difficultés. Le plan de câblage est présenté sur la figure 12. Les dimensions du coffret sont de $160 \times 100 \times 80 \text{ mm}$. Elles seront plus importantes si l'on utilise les circuits imprimés du pont RC précédemment décrit.

Les circuits et la pile sont fixés sur le fond du coffret. Le câblage du panneau est d'abord réalisé, puis les interconnexions entre le fond du coffret et le panneau le sont à leur tour. On veillera à disposer des connexions de forte section pour les liaisons figurant en trait renforcé sur le plan de câblage.

La mise au point consiste à vérifier la présence d'oscillations à la sortie de l'oscillateur dès la mise sous tension. Si on en a la possibilité on vérifiera la forme du signal que l'on améliorera, comme indiqué

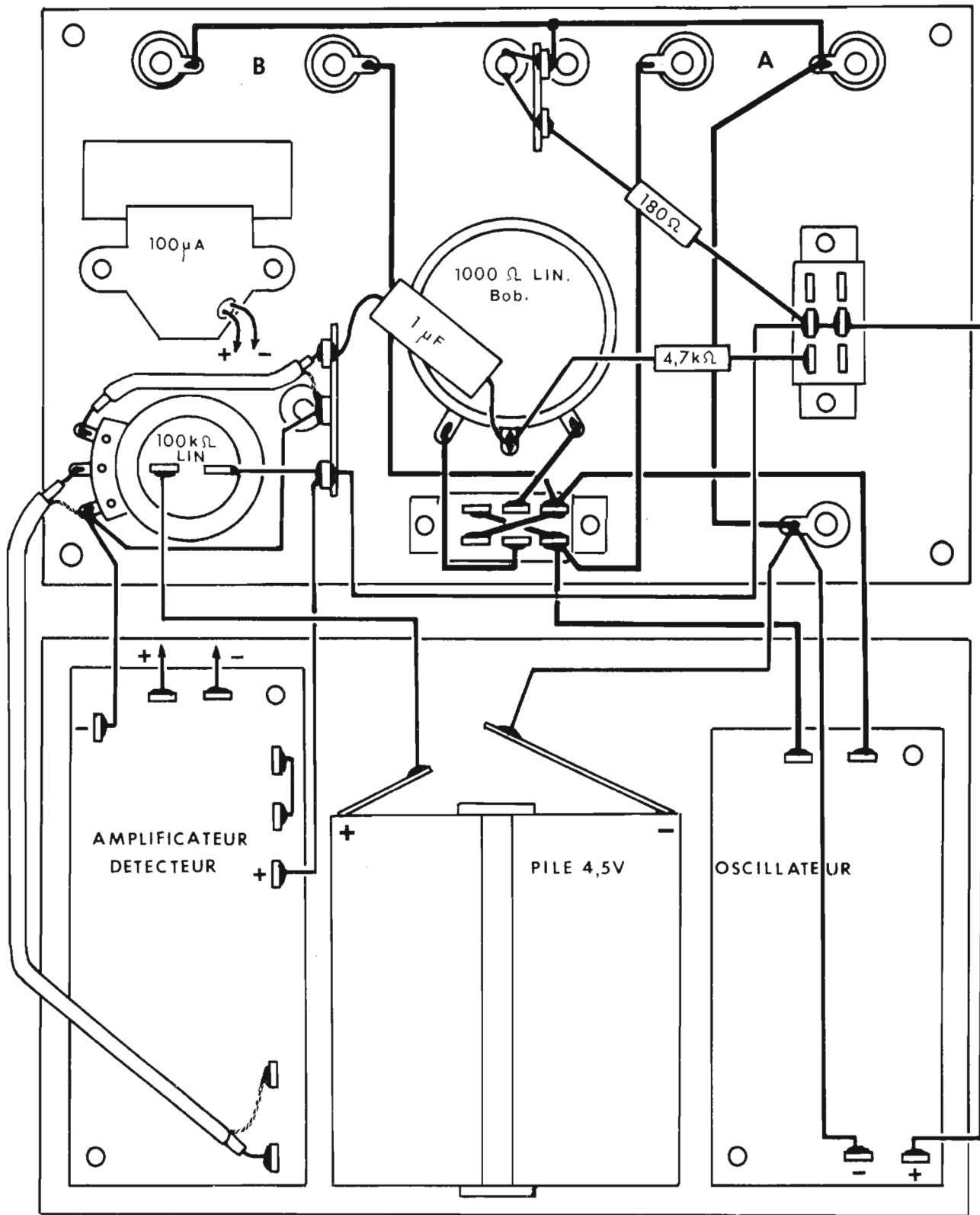


Fig. 12. - Plan de câblage du pont de comparaison équipé.

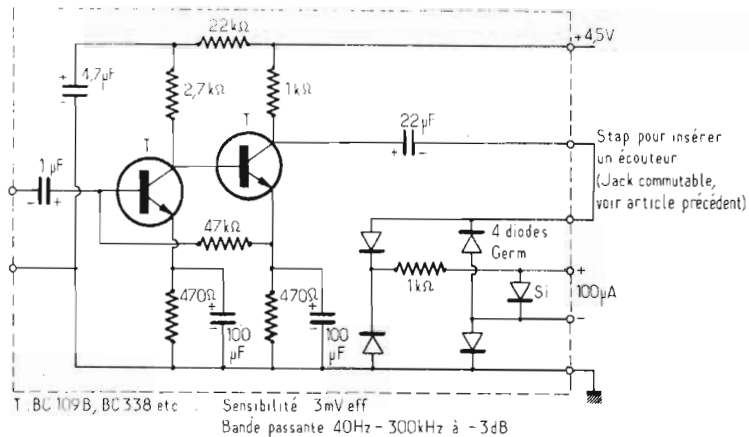


Fig. 11a

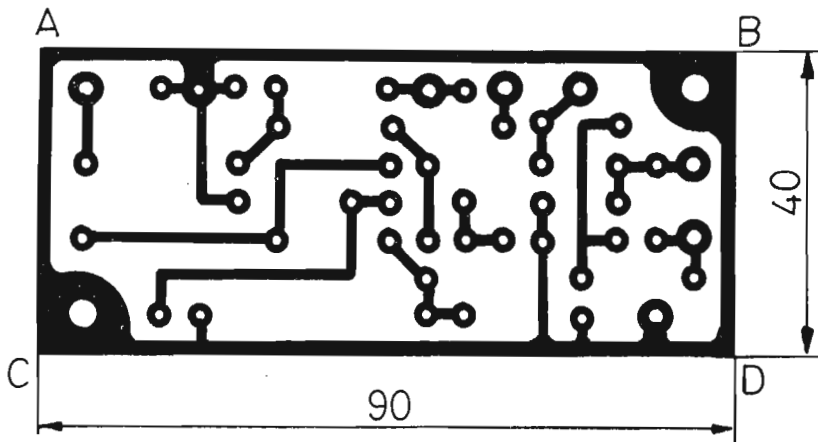


Fig. 11b

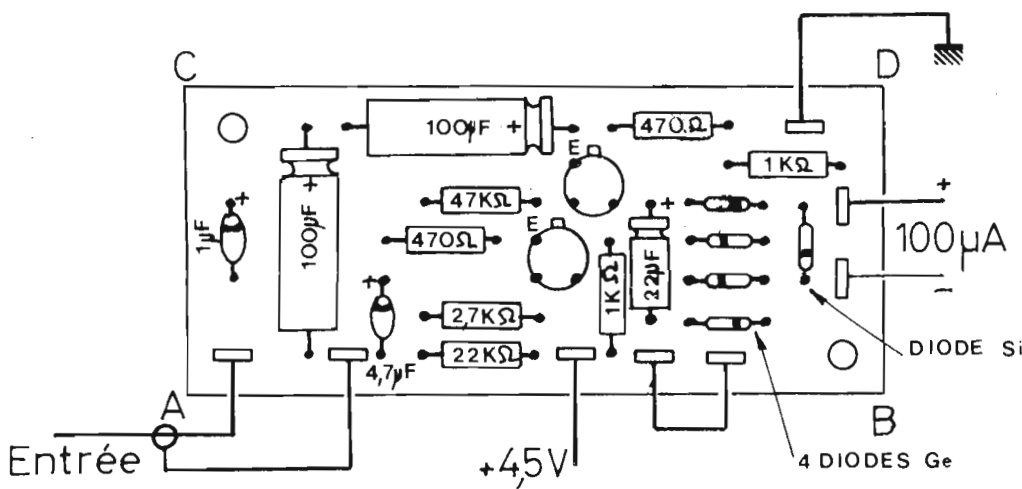


Fig. 11c

Fig. 11. - Réalisation de l'amplificateur détecteur.

plus haut par le condensateur Cs.

On mettra en court-circuit les bornes A et l'on réglera le curseur du potentiomètre de mesure sur 1. Dès que le bouton de réglage de la sensibilité est tourné légèrement vers la droite, le galvanomètre doit dévier à fond.

Le voyant à LED indique l'état de la pile. Cette dernière devra être changée dès que l'éclat du voyant diminue de façon sensible.

L'utilisation de ce pont s'étend à la mesure comparative des résistances de 0,1 Ω à plusieurs mégohms, des condensateurs de 10 pF à plusieurs milliers de microfarads (avec ou sans polarisation) et des inductances de 100 μH à plusieurs dizaines d'Henry. Au moyen de composants de valeur connue (éléments séparés ou boîtes à décades) on peut faire une mesure de valeur absolue.

La mesure d'impédances complexes est très délicate et la plupart des ponts ne permettent pas de réaliser ces mesures. Le pont de comparaison peut permettre de comparer deux valeurs complexes dans des conditions déterminées. Naturellement, les conditions de mesure devront être bien étudiées pour que cette comparaison soit significative et, notamment, le niveau et la fréquence du générateur ont une grande importance. Le pont de comparaison universel ne peut couvrir les impédances complexes que dans le spectre des audio-fréquences.

Par ailleurs, on peut comparer des transistors ou des diodes en utilisant la polarisation, comme dans le cas du petit montage de la figure 4. Bien d'autres applications sont possibles : il serait fastidieux d'en dresser une liste qui se voudrait exhaustive et nous préférons laisser cet exercice à l'imagination du lecteur...

(à suivre)
J.C.