

9. la mesure des distorsions

Le terme « fidélité » désigne bien la qualité essentielle que l'on recherche dans toute installation de reproduction sonore digne de ce nom. C'est à ce point exact que l'on a parfois abusivement poussé le qualificatif des chaînes courantes au niveau de « haute fidélité » voire de « très haute fidélité ».

En fait, la fidélité (en électro-acoustique s'entend !) est l'aptitude que possède un appareillage à capter, amplifier et reproduire sans les déformer les sons émis par une source primaire (voix, instruments de musique, bruits d'ambiance, etc.), transformés en signaux électriques et restitués sous forme d'ondes sonores. C'est du moins ce que l'on espère obtenir de toute installation de qualité.

A l'inverse, tout phénomène qui tend à déformer l'allure des signaux et entraîne une sensation physiologique désagréable à l'audition est à éliminer : c'est le sombre domaine des distorsions.

Assez souvent, il arrive qu'une chaîne qui donnait d'honnêtes résultats au moment de son achat se soit, peu à peu, détériorée par suite de la variation de valeur ou de la dégradation de certains composants avec le temps. Dans ces conditions, il est souvent peu facile de se rendre compte, à l'audition, de cette lente évolution, et, avant d'atteindre des limites intolérables, l'auditeur aura subi, à son insu, les méfaits de distorsions qui sont indignes de sa chaîne.

Le meilleur moyen de faire un test de qualité est donc de déceler et de quantifier ces imperfections, ce qui permettra de soigner la mise au point des amplificateurs, de faire des essais comparatifs, etc.

QUE SONT LES DISTORSIONS ET D'OU PROVIENNENT-ELLES ?

Supposons que l'on envoie à l'entrée d'un amplificateur une tension de 10 mV et que l'on trouve à la sortie une tension de 1 V : on en conclura que le gain de cet amplificateur est de 100 en tension.

On peut donc penser que si l'on

fait varier la tension d'entrée d'un certain pourcentage, la tension de sortie sera 100 fois plus importante, mais variera dans le même rapport. Si tel n'est pas le cas, on dit qu'il y a une mauvaise linéarité en amplitude et des distorsions apparaissent.

On peut utiliser ce phénomène par le diagramme de la figure 1 : la caractéristique linéaire est une droite, comme son nom l'indique ; toute autre allure se traduira par des distorsions d'amplitude.

Les origines de ces distorsions sont multiples. On peut citer :

a) la courbure de la caractéristique telle qu'elle est indiquée sur la figure 1. Cette courbure peut être due à une mauvaise conception à une polarisation défec-

tueuse, à la fuite d'un condensateur de liaison, à un transistor fonctionnant mal, etc. ;

b) le phénomène de saturation qui intervient dès que le niveau d'entrée a atteint un certain seuil et qui se traduit par une stabilisation de la tension crête de sortie si l'entrée augmente au-delà du seuil ;

c) le bruit, quelle que soit son origine, qui agit sur l'enveloppe du signal à très faible amplitude ;

d) la tendance à l'oscillation qui fait varier le gain de l'amplificateur en fonction du niveau et qui, à la limite, fait apparaître des amorces d'oscillation HF sur la crête des signaux ;

e) la modulation d'un signal par un autre (phénomène d'inter-

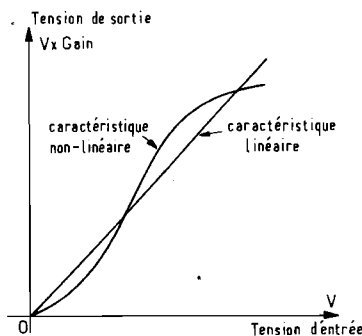


Fig. 1. - Caractéristique d'amplitude d'un amplificateur.

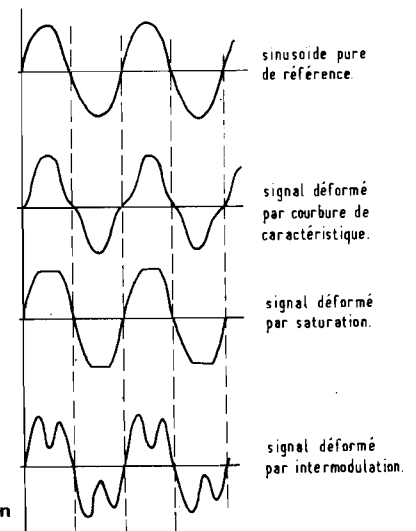


Fig. 2. - Différentes allures de déformation d'une sinusoïde.

modulation), due aussi à une courbure de caractéristique ;

l'effet thermique, la micro-phonie de certains éléments, les couplages indésirables, etc.

Comme on le voit, les causes ne manquent pas, ce qui implique que les remèdes doivent être parfaitement adaptés.

L'analyse des distorsions serait difficile s'il fallait comparer un signal de modulation quelconque d'allure complexe à l'entrée et à la sortie d'un amplificateur. La variation rapide, et quelque peu aléatoire, de l'amplitude ne permet pas une analyse sérieuse sauf, peut-être, pour ce qui est du bruit ou de la saturation que l'on peut déceler à l'oscilloscope sur un signal de forme non définie.

Fort heureusement, on a pu démontrer que tout signal peut être décomposé en une série de raies spectrales correspondant chacune à une sinusoïde pure. Dès lors, il suffira d'analyser le comportement d'un amplificateur excité par une tension sinusoïdale « propre », de fréquence donnée, à l'entrée, pour en tirer des conclusions à peu près sérieuses sur son aptitude à amplifier sans les déformer les signaux de modulation de forme complexe quelconque.

La figure 2 montre, à titre d'exemple, quelques oscillogrammes caractéristiques de signaux distordus. On peut voir que l'allure du signal déformé varie suivant la cause de la déformation, ce qui permet, déjà, de faire un diagnostic à l'oscilloscope pour trouver l'origine de l'anomalie. Toutefois, on ne saurait retenir la méthode d'examen oscillographique que pour les signaux dont les déformations sont relativement importantes. La comparaison du signal d'entrée et de celui de sortie, sur deux traces est déjà un perfectionnement qui apportera une méthode plus efficace et plus fine d'appréciation des déformations mais la quantification ne pourra pas en être faite par ce moyen.

Une autre approche du problème consisterait à tracer la droite $V_{\text{sortie}} = k \cdot V_{\text{entrée}}$ à différentes fréquences, mais la mesure qui devrait se faire dans des conditions de précision assez grande est difficile à mettre en œuvre et risque de donner des valeurs fausses avec des montages habituels (ceux que détient l'amateur).

On obtiendra des résultats bien supérieurs avec des appareils spé-

cialement conçus pour mesurer des distorsions tels que ceux que nous décrivons dans le présent article.

LA DISTORSION HARMONIQUE

L'une des figures les plus caractéristiques utilisées pour quantifier la linéarité d'un amplificateur est la distorsion harmonique que l'on peut définir ainsi :

Si l'on envoie une sinusoïde pure à l'entrée d'un amplificateur, avec son niveau nominal, le signal de sortie se trouvera d'autant plus déformé que l'amplificateur a une caractéristique non linéaire et le spectre correspondant présentera en plus de la raie fondamentale à F_0 , une suite de raies harmoniques à $2 F_0$, $3 F_0$, etc., d'autant

plus importante en nombre et en amplitude que la non linéarité de l'amplificateur sera plus prononcée.

Si l'on désigne par a_1 , l'amplitude du signal à la fréquence fondamentale F_0 , par a_2 l'amplitude de l'harmonique 2 à $2 F_0$, etc., la définition mathématique du taux de distorsion harmonique est :

$$D_{\text{(harmonique)}} \text{ en } \% = \frac{a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + \dots + a_n^2} \times 100$$

La valeur de ce taux de distorsion (dit aussi taux global de distorsion harmonique), suivant qu'elle s'applique à des amplificateurs quelconques ou à des appareils très élaborés, peut varier dans de grandes limites (de 2 à 3 % à 0,05 % et même moins). Des valeurs de 0,5 à 1 % sont très acceptables. Il ne faut pas oublier

que dans une chaîne dite à haute fidélité l'amplificateur est l'élément dont on cite le plus volontiers le taux de distorsion harmonique alors qu'il est généralement très inférieur à celui que donne un disque sur sa platine (2 à 3 %), un magnétophone (2 à 4 %), un tuner (0,5 à 3 %), une très bonne enceinte (1 à 4 %), etc.

Théoriquement, pour mesurer ce taux de distorsion, il conviendrait de filtrer le fondamental, puis chaque harmonique, sur le signal de sortie, de mesurer la tension correspondante à chaque raie spectrale et d'appliquer la formule citée. On conçoit aisément que cette méthode soit extrêmement laborieuse. Elle est encore utilisée dans certains laboratoires qui font de l'analyse spectrale, ce qui permet de connaître le taux d'harmonique de rang donné. Il n'est pas question de proposer

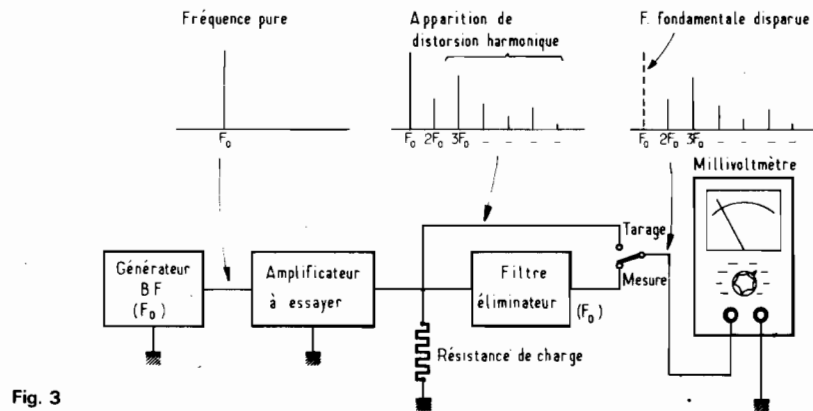


Fig. 3

Fig. 3. - Mesure de la distorsion d'un amplificateur.

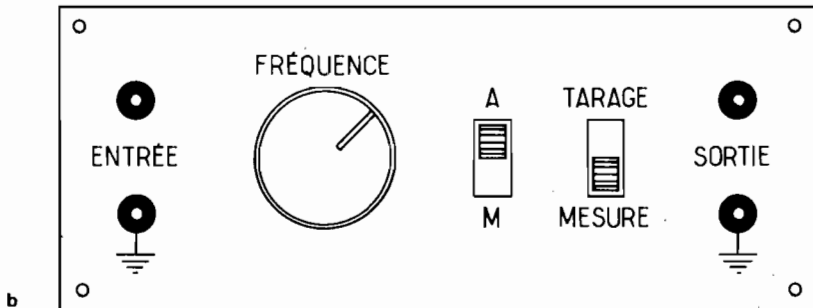
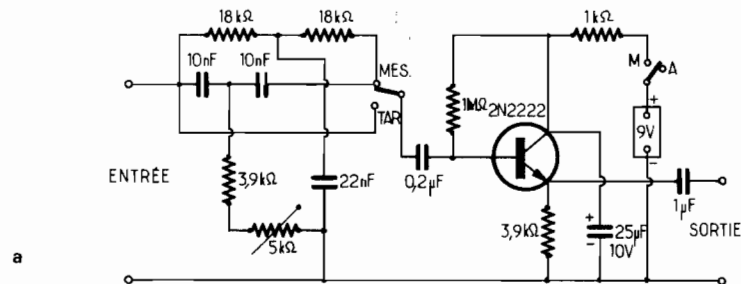


Fig. 4. - Un distorsiomètre ultra-sensible.

cette méthode sophistiquée à nos lecteurs.

Beaucoup plus pratique est la mesure qui fait appel à un distorsiomètre mesurant le taux global de distorsion.

Pour avoir une idée de la méthode utilisée on se reportera à la figure 3. L'amplificateur à essayer est attaqué par une tension sinusoïdale aussi pure que possible (valeur nominale en amplitude). On branche à la sortie la résistance de charge recommandée.

Dans un premier temps on mesure au moyen d'un millivoltmètre de tension efficace, la tension aux bornes de la résistance de charge, soit U_1 .

Puis l'on répète l'opération en interposant entre la sortie de l'amplificateur et le millivoltmètre, un filtre réjecteur éliminant la fréquence fondamentale dans le signal à mesurer. On mesure alors U_2 .

Le taux global de distorsion harmonique sera égal à :

$$D(\text{en } \%) = 100 \frac{U_2}{U_1}$$

Si, par exemple, $U_1 = 10 \text{ V}$ et $U_2 = 50 \text{ mV}$, le taux global de distorsion sera de 0,5 %.

Nous avons indiqué sur la figure 4 le schéma et la présentation d'un appareil très simple qui permettra de mettre en pratique cette méthode de mesure. La fréquence de fonctionnement est de 1 000 Hz.

Un filtre réjecteur en double T est disposé à l'entrée. Un commutateur permet de mettre en service ou non ce filtre. Le curseur du commutateur est réuni, à travers un condensateur d'isolement, à la base d'un transistor monté en collecteur commun. L'impédance d'entrée élevée du transistor ne perturbe pas la caractéristique réjectrice du filtre et permet d'avoir une faible résistance de sortie vers l'appareil de mesure. Pour être certain de centrer exactement le filtre sur la fondamentale, un réglage fin de fréquence permet de parfaire l'accord.

Toutefois, ce petit appareil, très utile lorsqu'il s'agit de faire des tests comparatifs, ne saurait donner des valeurs précises de taux global car la réjection de la fondamentale entraîne également un affaiblissement sur les harmoniques 2 et 3.

UN DISTORSIOMETRE HARMONIQUE A PONT DE WIEN

Pour obtenir un résultat plus précis, il convient de faire appel à un distorsiomètre à filtre actif dont un bon exemple est donné sur le schéma de principe de la figure 5a.

Cet appareil comporte 3 étages, un pont de Wien et un dispositif de contre-réaction qui augmente la sélectivité.

Le pont de Wien, dont on a déjà eu l'occasion de parler à propos des générateurs BF, est un circuit relativement simple dont le schéma équivalent est donné en figure 5b. Il comporte deux branches AM et BM formées respectivement par les résistances Rc et Re, et deux autres branches : AS qui porte R et C en série et BS avec R et C en parallèle.

On introduit le signal alternatif entre A et B. Si le pont est équilibré, aucun signal n'apparaît entre S et M. Cet équilibre n'est atteint que si deux conditions sont remplies :

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{et} \quad RC = 2Re.$$

Ceci revient à dire que l'on peut accorder le pont sur une fré-

quence bien particulière pour laquelle il exerce un filtrage parfait théorique.

Si l'on se reporte au schéma 5a, on note que le signal est envoyé sur T_1 (étage déphaseur) dont les résistances de collecteur et d'émetteur sont dans un rapport 2, les tensions en A et B étant en opposition.

La base de T_1 est polarisée par le pont de résistances R_2 et R_3 (en contre-réaction vers R_{13}). La résistance R_1 sert à limiter le courant base, au cas où une tension excessive se trouverait présente à l'entrée : T_1 est alors protégé de la destruction.

Les deux autres branches du pont sont formées par R_7 en série avec C_2 et R_8 en parallèle avec C_3 .

La tension d'erreur du pont, disponible en S, est amplifiée par les transistors T_2 et T_3 montés en liaison directe. Le gain est relativement faible mais la distorsion propre à cet amplificateur est indécélable en raison des contre-réactions présentes (émetteurs de T_2 et de T_3 non découplés, retour de R_{10} vers R_{13}).

L'effet de la contre-réaction globale par R_3 est mis en valeur sur le graphique de la figure 5c. Sans CR, la sélectivité du filtrage est insuffisante car les harmoniques 2 et 3 sont atténués en même

temps que la fondamentale. Si on limite le niveau de sortie avec un dispositif de CR, ces mêmes harmoniques ne seront pas affectés par le filtrage et la mesure sera significative.

La figure 6 indique le schéma complet de l'appareil.

La résistance R_4 (R_e) est complétée par un potentiomètre P_2 (balance) et une résistance ajustable R_6 .

De la même façon, le réglage de fréquence est assuré par P_3 avec un réglage grossier donné par la résistance ajustable R_9 .

De plus, pour éviter d'avoir à décaler la fréquence du générateur pour le tarage, on a prévu un double inverseur mesure/tarage qui peut mettre le pont hors service.

Le fonctionnement est assuré, d'une part, en branchant l'entrée de l'appareil à la sortie d'un amplificateur chargé par sa résistance nominale, d'autre part, en réunissant la sortie à un millivoltmètre capable de mesurer au moins 10 mV à 1 V eff à pleine échelle (se référer, par exemple à l'un des appareils décrits dans le précédent article).

L'appareil est prévu pour fonctionner sur 1 000 Hz. On met l'inverseur sur la position tarage et l'on règle le potentiomètre de niveau P_1 pour lire 1 V sur l'appareil de mesure. Cette quantité représente la valeur 100 %.

On passe alors en position mesure et l'on règle successivement P_2 et P_3 , sans retoucher à P_1 , jusqu'à ce que la lecture la plus faible soit atteinte. Pour lire correctement celle-ci, il conviendra de passer sur la sensibilité la plus faible possible. Chaque commutation apportera une modification de l'échelle du taux de distorsion de la manière suivante :

100 mV représentent 10 %
10 mV représentent 1 %
1 mV représente 0,1 % de distorsion globale.

Il est essentiel, pour faire une lecture précise, de tourner très doucement les potentiomètres P_2 et P_3 .

Lors de l'étalonnage de l'appareil, après avoir mis P_2 et P_3 à mi-course, on ajustera R_6 et R_9 successivement pour obtenir un minimum de lecture en sortie avec un générateur stable (et sans distorsion) réglé exactement sur 1 000 Hz.

La figure 7 montre la courbe de réponse du filtre accordé sur 1 000 Hz. La pointe inférieure « descend » en dessous de

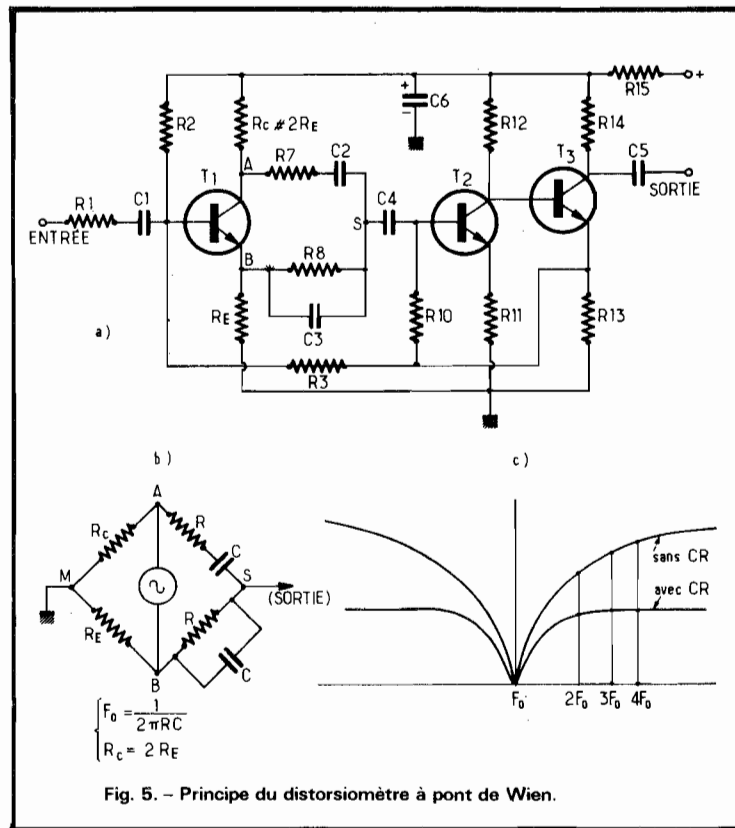


Fig. 5. - Principe du distorsiomètre à pont de Wien.

60 dB : ce chiffre correspond à un taux de 0,1 % ; on peut espérer obtenir une mesure jusqu'à 0,05 % si l'on soigne particulièrement bien les réglages. Il ne faut oublier cependant que les générateurs qui ont un taux de distorsion aussi bas ne sont pas très courants ni très économiques.

La réalisation pratique de l'appareil ne présente pas de difficultés particulières. On a présenté sur la figure 8 le dessin du circuit imprimé et la disposition des composants avec plan de câblage.

On s'attachera à choisir des composants de tout premier choix : la stabilité des réglages, qui en dépend, est un paramètre essentiel sur ce montage. Les résistances du pont seront du type 1 ou 2 % à couche (de préférence 1 W). Les condensateurs seront choisis dans une série 2,5 % (ou mieux) au polystyrène. Les potentiomètres P₂ et P₃ seront **obligatoirement** des

modèles bobinés (genre Minibob ou équivalent).

Bien que nous n'ayons représenté qu'un modèle monofréquence, rien ne s'oppose, en principe, à réaliser un appareil pouvant fonctionner sur plusieurs fréquences en commutant différentes valeurs de condensateurs du pont (la fréquence est inversement proportionnelle à la capacité). Là aussi, la qualité du commutateur devra être irréprochable (modèle à pinces à contacts auto-nettoyants).

Nous déconseillons l'utilisation de potentiomètres et de résistances ajustables (fréquence et balance) de plus fortes valeurs que celles que nous indiquons, car l'accord précis devient impossible et les lectures obtenues, surtout sur faible taux, risquent d'être totalement erronées.

Les lecteurs intéressés par le problème de la distorsion harmonique et par sa mesure pourront

consulter les articles et ouvrages qui lui sont consacrés. Signalons, à titre d'exemple, quelques références bibliographiques :

— Le Haut-Parleur, n° 1330, p. 157 : « Mesures sur les amplificateurs d'après les normes 45500 ».

— Dans le même numéro, pp. 190 à 192 : « Conception et réalisation d'un distorsiomètre à 5 gammes ».

— Hi-Fi Stéréo n° 1453, pp. 115 à 120 : « Mesure et analyse des harmoniques ».

LA DISTORSION PAR INTERMODULATION ET SA MESURE

Lorsqu'on envoie **simultanément**, par mélange linéaire, à l'entrée d'un amplificateur deux signaux sinusoïdaux de fréquences différentes, on peut observer en sortie une modulation du

signal à fréquence élevée, par celui à fréquence plus basse. Ce phénomène parasite est créé par la courbure de la caractéristique d'amplitude de l'amplificateur et/ou par une amplitude trop élevée de l'un des signaux. On dit que le signal de sortie est affecté d'une distorsion par intermodulation.

Un amplificateur linéaire ne montrerait, à sa sortie que la somme des amplitudes des signaux qui y sont entrés (au gain près).

On se doute qu'il existe un lien étroit entre la distorsion par intermodulation et la distorsion harmonique. Ces deux phénomènes sont, en effet, liés à la non linéarité d'amplitude de l'appareil considéré. D'ailleurs, il y a de la distorsion harmonique s'il y a de la distorsion par intermodulation.

D'une façon générale, le taux de distorsion par intermodulation est 3 à 4 fois plus élevé en % que le taux global de distorsion harmonique et il est relativement difficile de réaliser des amplificateurs dont « l'intermodulation » soit très inférieure à 1 % mesurée dans les conditions que nous précisons plus loin.

L'intermodulation entraîne un certain « embrouillement » du passage sonore surtout si ce dernier est complexe et comporte un spectre étendu de fréquences et de fortes amplitudes de crête. Il est toutefois assez difficile de discerner, sans comparaison avec une référence, la présence d'intermodulation dans un signal sonore, à moins que celle-ci soit très importante. Il n'en est pas de même avec la distorsion harmonique qui peut être « sentie » dès 3 à 4 % par des oreilles expertes.

La mesure du taux de distorsion par intermodulation se fera dans des conditions déterminées qui sont bien définies dans les normes DIN 45500.

On envoie à l'entrée de l'amplificateur à essayer un signal composite formé d'une tension à 8 kHz à laquelle est superposé un signal de 250 Hz d'amplitude 4 fois plus élevée.

On dispose entre la sortie de l'amplificateur et un oscilloscope un filtre passe-haut qui élimine le signal à 250 Hz et ne laisse subsister que celui à 8 kHz plus ou moins modulé par le 250 Hz.

La figure 9a montre la disposition des éléments de mesure et l'allure des signaux observés. On notera la résistance ajustable de 1 kΩ qui permettra d'obtenir le

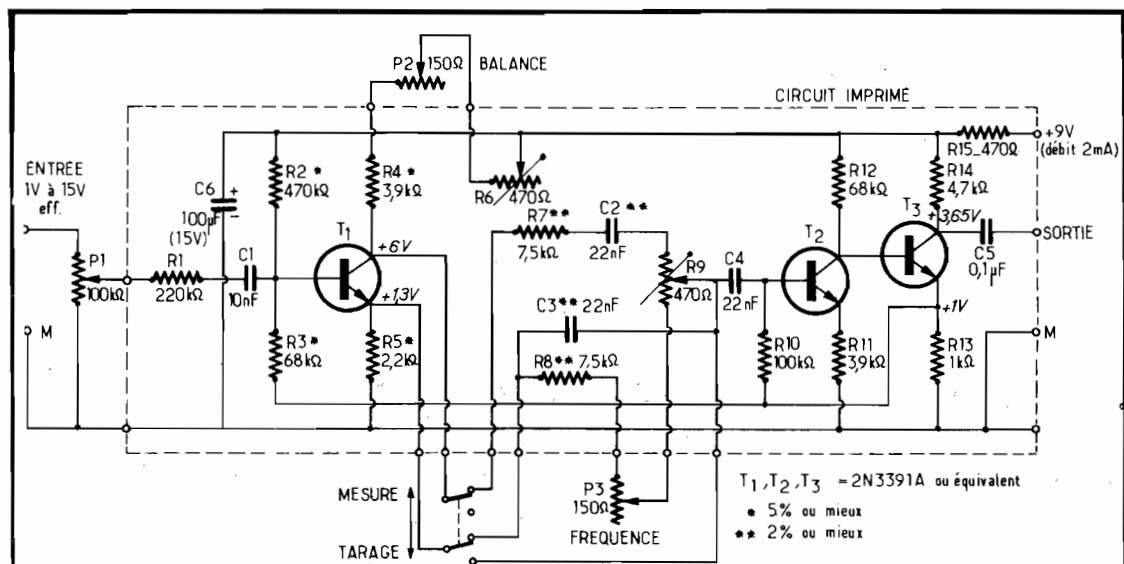


Fig. 6. - Schéma complet du distorsiomètre harmonique 1 000 Hz à Pont de Wien.

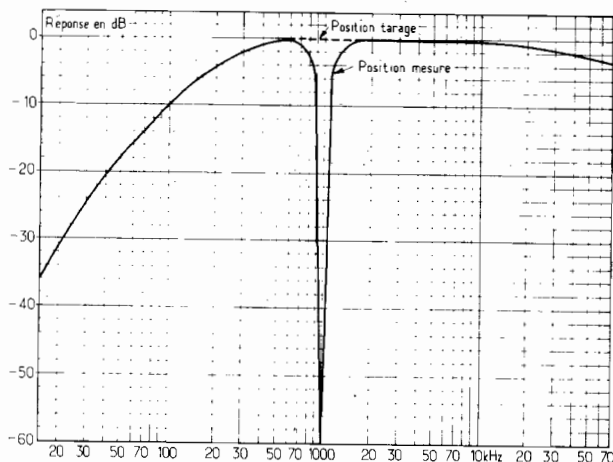


Fig. 7. - Courbe de réponse du filtre réjecteur de fondamentale (1 000 Hz).

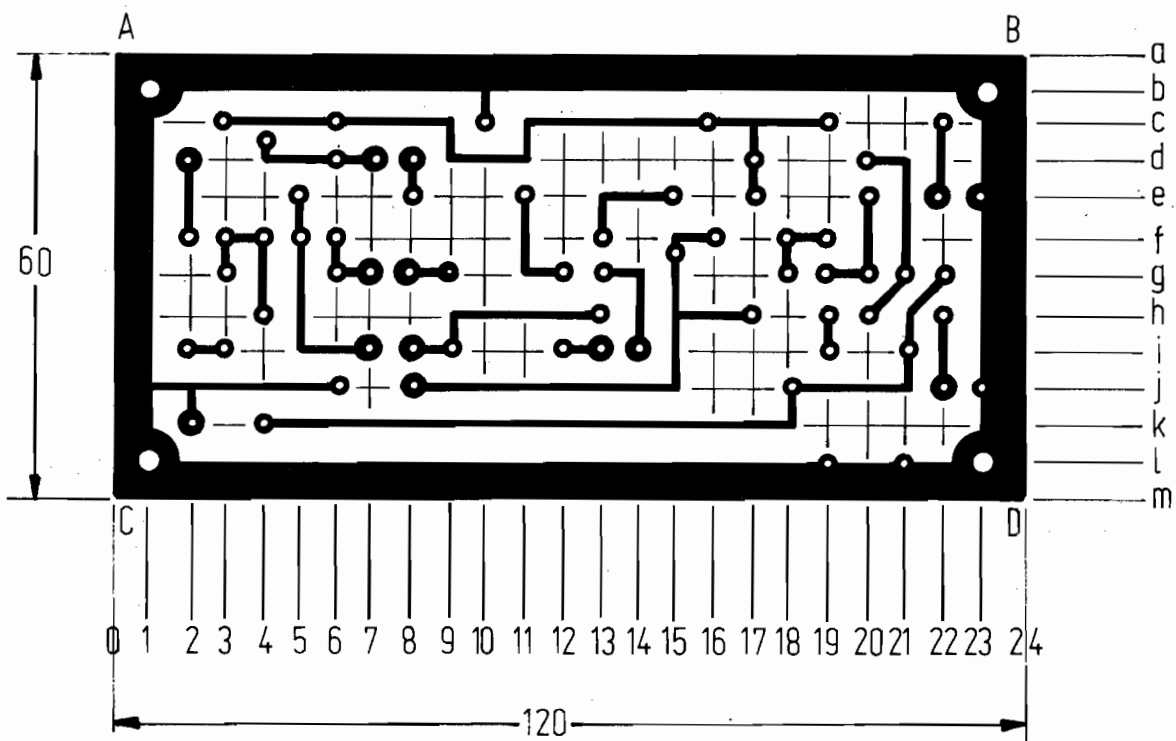
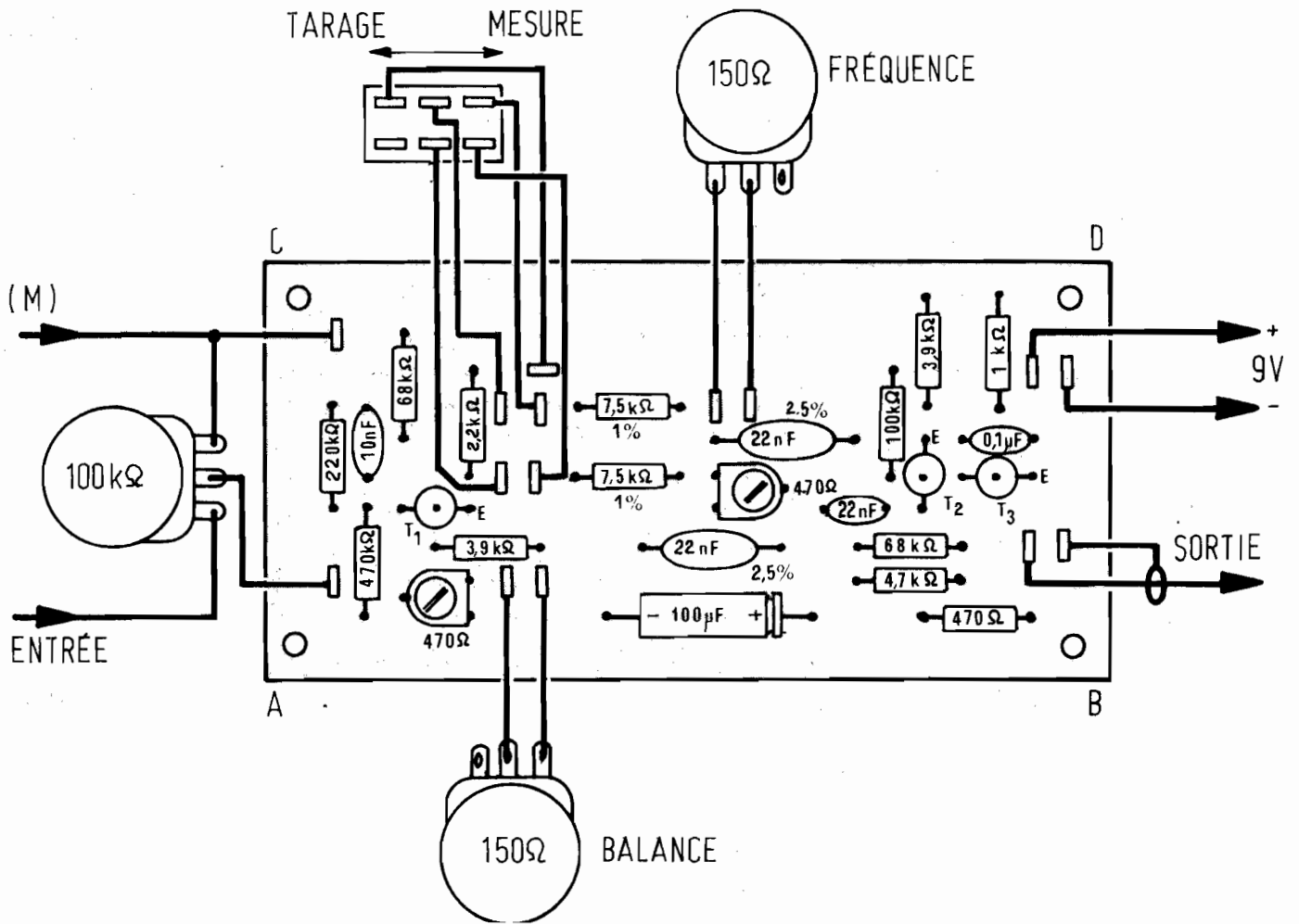


Fig. 8. - Réalisation du distorsiomètre harmonique à Pont de Wien.

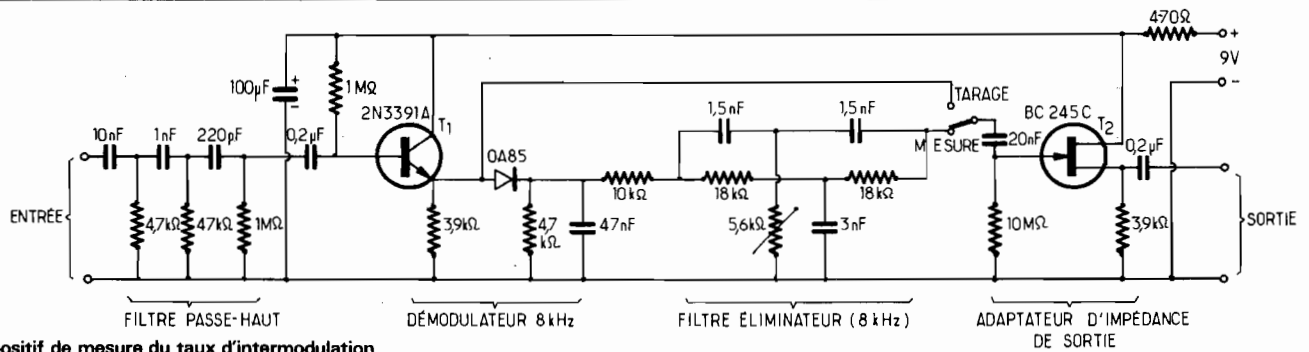


Fig. 10. - Dispositif de mesure du taux d'intermodulation.

bon rapport de tension entre les deux sources.

La tension modulée en sortie fait apparaître une amplitude crête à crête qui peut varier de b à a . Le taux de distorsion par intermodulation sera égal à :

$$D (\%) \text{ intermod.} = 100 \frac{a - b}{a + b}$$

qui n'est autre que le taux de modulation du signal à 8 kHz.

L'observation de la modulation

sur l'oscilloscope sera facilitée si l'on synchronise le balayage sur l'un des signaux (de préférence celui à 8 kHz). Si on en a la possibilité, on observera une extrémité seulement du signal en augmentant la sensibilité de l'amplificateur vertical et en décadrant l'image de moitié : la mesure sera alors plus précise.

On a représenté sur les figures 9b et 9c les schémas des oscillateurs de référence. Le montage

est très classique : il s'agit de 2 étages en cascade avec en réaction entre l'émetteur du deuxième transistor et la base du premier, un filtre en double T qui assure une très bonne stabilité et une tension exempte d'harmoniques. Eventuellement, pour se situer à la limite de l'accrochage, il est possible de diminuer la résistance d'émetteur du premier transistor (résistance ajustable), ce qui donnera l'onde la plus pure.

Le filtre passe-haut représenté en 9d est un simple réseau RC à trois mailles qui atténue le signal à 250 Hz de plus de 70 dB et d'un peu moins de 10 dB celui à 8 kHz.

Cette méthode de détermination du taux d'intermodulation peut, cependant s'avérer peu pratique à mettre en œuvre et peu précise pour les taux faibles. Nous proposons un appareil un peu différent sur la figure 10.

Le transistor T_1 , monté en émetteur follower, reçoit sur sa base le signal débarrassé de la composante à 250 Hz par le filtre passe-haut.

La tension modulée qui apparaît sur l'émetteur de T_1 est envoyée sur un démodulateur qui restitue le 250 Hz d'enveloppe et élimine le 8 kHz résidu de détection. Pour parfaire le filtrage on fait suivre ce circuit de démodulation d'un double T coupe-bande réglé sur 8 kHz.

On mesurera l'amplitude du signal à 250 Hz au moyen d'un millivoltmètre ou d'un oscilloscope calibré en amplitude verticale. Le FET (T_2) sert à isoler l'appareil de mesure du filtre en double T ; l'impédance de porte est très élevée mais la source présente une résistance faible.

Pour pouvoir comparer l'amplitude du signal à 8 kHz (valeur moyenne) avec celle du signal provenant de la démodulation, on a prévu un inverseur tarage/mesure qui met ou non le démodulateur en circuit.

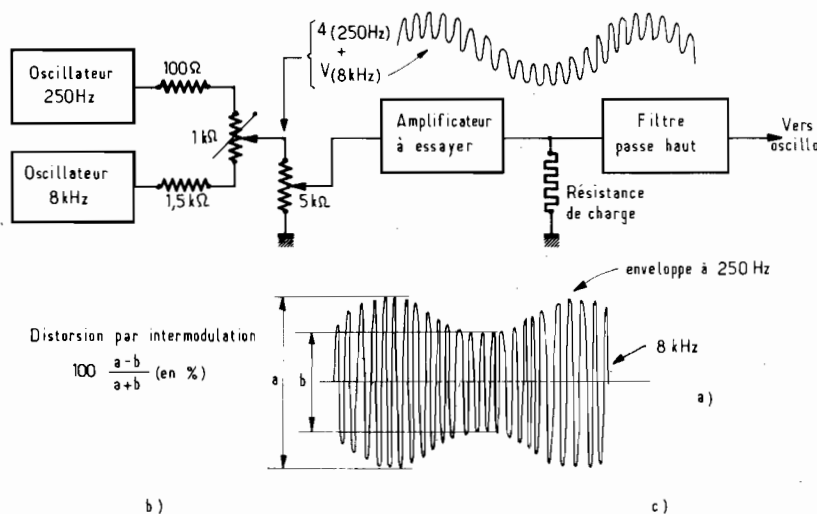
Le taux de distorsion par intermodulation est alors donné par :

$$D (\%) \text{ interm.} = \frac{U \text{ à } 250 \text{ Hz}}{U \text{ à } 8 \text{ kHz}}$$

L'étalonnage de l'appareil se fera en comparant les résultats obtenus par cette méthode avec celle faisant appel à l'interprétation d'un oscillogramme.

(à suivre)

J.C.



$$100 \frac{a - b}{a + b} \text{ (en \%)}$$

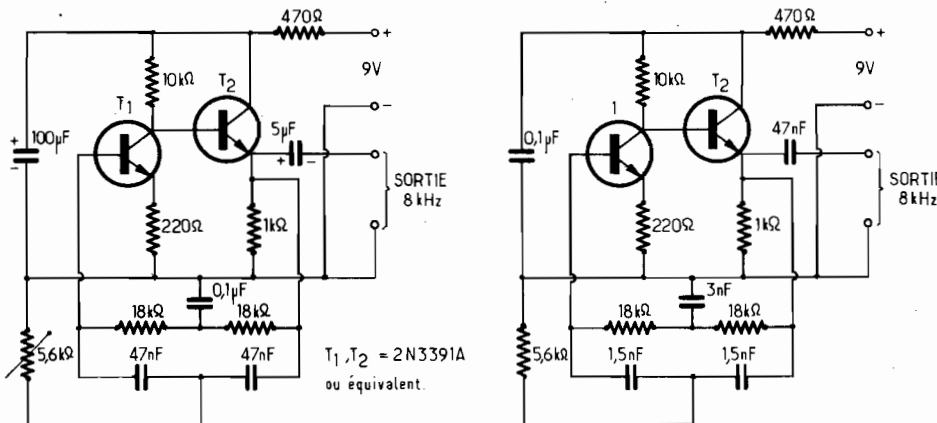


Fig. 9. - Distorsion d'intermodulation :

- a) principe de la mesure.
- b) oscillateur à 250 Hz.
- c) oscillateur à 8 kHz.
- d) filtre passe-haut.

