

La mesure des distorsions en audiofréquence

par P. MATEO (*)

Les exigences des utilisateurs quant à la qualité des équipements audiofréquence ainsi que de la très vive concurrence existant dans ce domaine, ont conduit les différents constructeurs à proposer des produits de plus en plus sophistiqués et performants. Parmi toutes les mesures caractérisant ces performances, la mesure des distorsions est l'une des plus importantes.

Le niveau atteint aujourd'hui par la plupart des équipements exige des techniques et des appareils de mesure dont l'utilisation était jusqu'à présent souvent délicate. La multiplicité des méthodes de mesure employées a également conduit à une certaine confusion lors de l'interprétation des résultats et de la comparaison entre équipements. Ceci est plus particulièrement vrai avec l'introduction de méthodes de mesure de la distorsion transitoire (« transient Intermodulation » ou TIM). Cet article a pour but de décrire les principales techniques employées pour la mesure des distorsions.

classe B où les composants de sortie ne conduisent que pendant la moitié d'un cycle. Certaines discontinuités peuvent exister au point de raccordement.

- dissymétrie dans les étages de sortie due à des différences de gains.
- contacts non résistifs dans les supports de transistors (ou dans les soudures). Ceci peut créer un léger effet de redressement.
- distorsion dans l'étage différentiel d'entrée d'un amplificateur cau-

sée par des sources de courant parfaites. Ceci provoque une variation de gain lorsque l'étage est attaqué en mode commun.

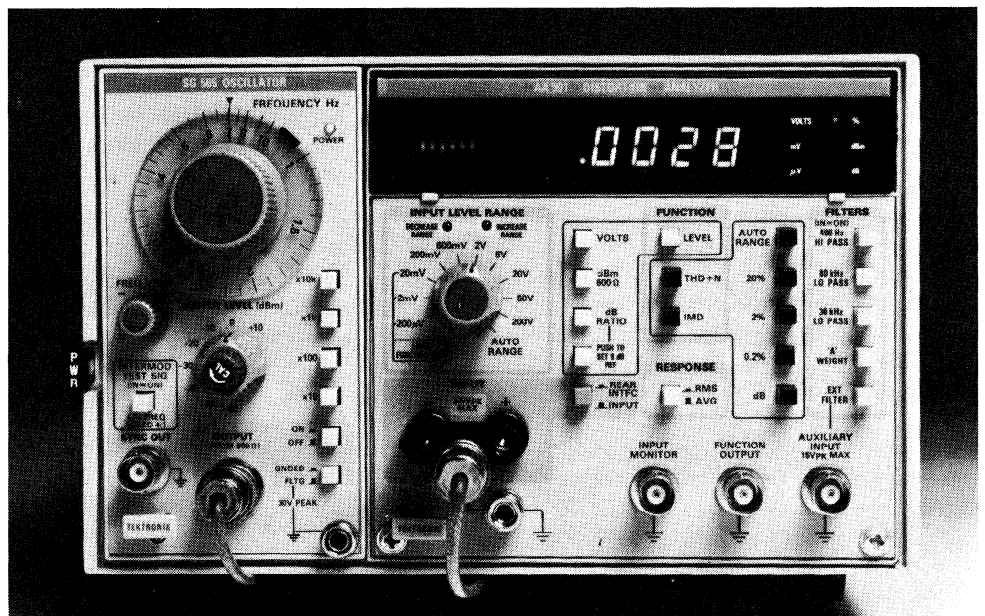
Toutes ces causes ont leur équivalent dans chaque partie d'un équipement : dans le cas de haut-parleur par exemple, il existe des non-linéarités dans la suspension du cône, il peut arriver que des bandes magnétiques soient saturées pendant un enregistrement, etc. Tous ces effets sont relativement peu dépendants de la fréquence bien que leur ampli-

Mesures et types de distorsions

La mesure de distorsion consiste à évaluer le taux d'impuretés présent dans un signal. Celles-ci sont généralement provoquées par des non-linéarités de la chaîne d'amplification (fig. 1).

Les distorsions ont de nombreuses causes, certaines dites « statiques » proviennent des non-linéarités propres au composant ou à la nature du circuit utilisé, comme par exemple :

- non-linéarité dans l'étage d'entrée due à la caractéristique logarithmique de la jonction Base émetteur des transistors bipolaires.
- distorsion de raccordement dans le cas d'amplificateurs utilisés en



* Tektronix France

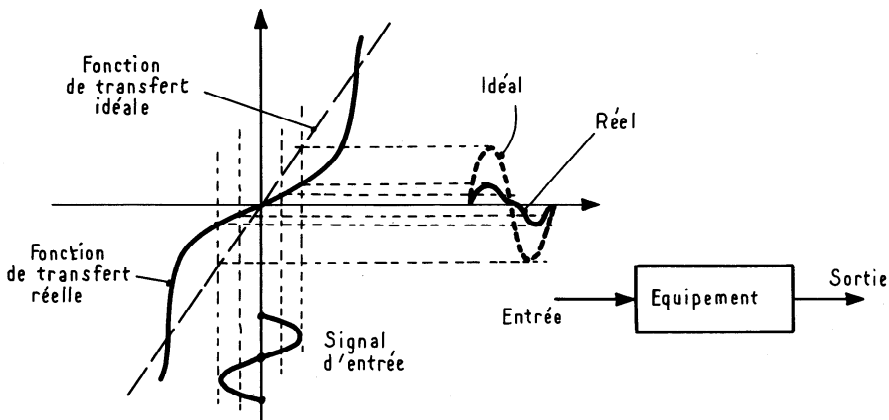


Fig. 1. - Système d'amplification idéal et réel.

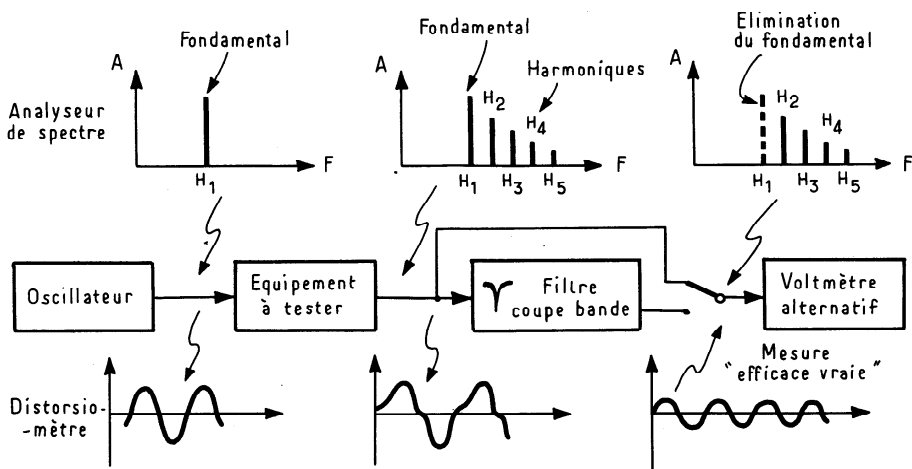


Fig. 2. - Mesure de la distorsion harmonique globale.

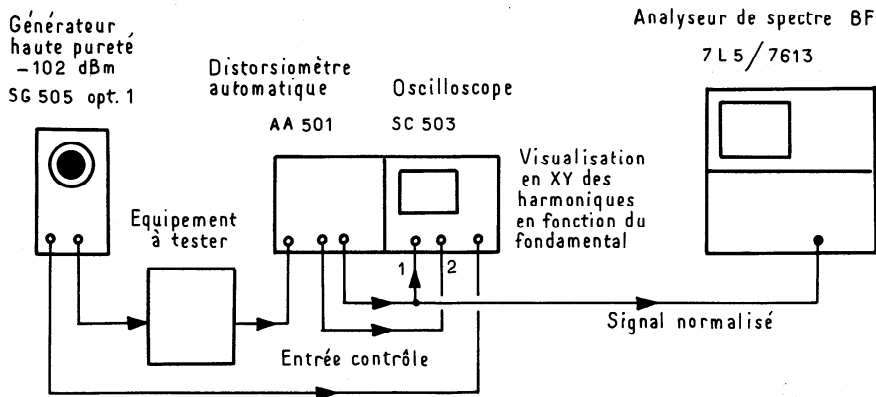


Fig. 3. - Equipement pour la mesure de distorsion.

tude puisse changer proportionnellement au facteur de contre-réaction si celui-ci dépend de la fréquence. Ceci distingue ce type de distorsion d'autres distorsions dites « dynamiques ». Ces dernières sont fortement dépendantes de la fréquence ou des variations rapides du signal. Les distorsions transitoires (ou TIM) incluses dans ce groupe, ne sont en fait rien d'autre que le résultat de non-linéarité d'un étage d'amplification en haute fréquence,

généralement due au courant de charge et de décharge de condensateurs de compensation.

Parmi les causes de distorsions dynamiques nous pouvons citer :

- stockage de charge dans la jonction Base-émetteur pour les transistors bipolaires (ceci est généralement un problème spécifique aux transistors parcourus par de forts courants).
- capacité (non-linéaire) Base-

collecteur des transistors provoquant des variations de gain lorsque la tension Base-collecteur change avec le signal.

- augmentation du courant de charge des capacités de compensation en haute fréquence. Ce courant supplémentaire accentuant les non-linéarités de l'étage délivrant le courant.

- couplage électrostatique entre circuits non-linéaires (alimentation, détecteurs) et circuits sensibles.

- circuits à la limite de la stabilité, souvent rendus instables par un signal haute fréquence. Ceci peut apparaître comme une distorsion.

- couplage électromagnétique entre les fils d'alimentation et les boucles de contre-réaction (l'amplificateur traite cette perturbation comme le signal).

- Les distorsions peuvent également croître lorsque la fréquence diminue, comme par exemple dans les cas suivants :

- distorsion due aux composants actifs eux-mêmes si leur constante thermique est suffisamment courte pour permettre un changement de température de la jonction avec la fréquence du signal.

- les tensions d'alimentation peuvent être modulées par le signal basse fréquence. Si les amplificateurs rejettent mal cette modulation une distorsion apparaît.

- il peut survenir une saturation des circuits de compensation de sortie (RCL) dans le cas de fort courant basse fréquence.

- les condensateurs utilisés peuvent provoquer des distorsions du fait de leur coefficient de tension ou de l'absence de polarisation.

Ces quelques exemples montrent que les causes de distorsions, par conséquent les risques de détérioration des performances, sont nombreuses et qu'il est absolument nécessaire de pouvoir les mesurer afin de les éliminer.

Méthodes et appareils de mesure

Plusieurs méthodes ont été proposées pour mesurer les distorsions statiques et dynamiques. Chacune d'entre elles est considérée par son auteur comme la meilleure possible pour une ou toutes les applications. Les principales méthodes employées sont les suivantes :

- mesure de distorsion harmonique globale,
- mesure d'intermodulation suivant procédure SMPTE (Sty of Mo-

tion Picture and Television Engineers) ou DIN (Deutsches Institut für Normung TV)

— mesure des produits d'intermodulation suivant procédure CCIF (International Telephone Consultative Committee)

— mesure de distorsion avec excitation par signal rampe

— mesure de distorsion avec excitation par triple signal (3 tons).

Ces trois dernières méthodes ont été récemment proposées pour la mesure de distorsions transitoires (TIM).

L'information fournie par chaque méthode revêt une importance différente suivant qu'elle est destinée à l'utilisateur final ou à l'ingénieur de conception.

En effet, ce qui intéresse l'utilisateur est ce qu'il entendra, d'où la nécessité d'une mesure pondérée (oreille) tenant compte de toutes les distorsions. Une information de cette nature permet facilement la comparaison. Le concepteur souhaitera quant à lui pouvoir analyser chaque type de distorsion afin d'en déterminer et supprimer la cause.

Distorsion harmonique

La mesure de la distorsion harmonique globale est la plus ancienne et la plus répandue des méthodes. Celle-ci consiste à exciter l'équipement à tester par un signal sinusoïdal très pur et à mesurer la valeur globale des harmoniques présentés dans le signal de sortie (pour être

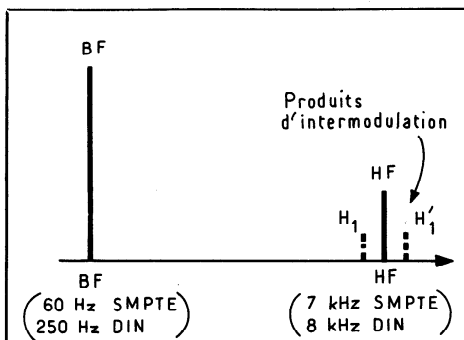


Fig. 4. - Test d'intermodulation suivant procédure SMPTE et DIN.

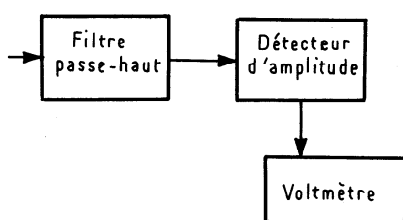


Fig. 5. - Principe de mesure suivant procédure SMPTE ou DIN.

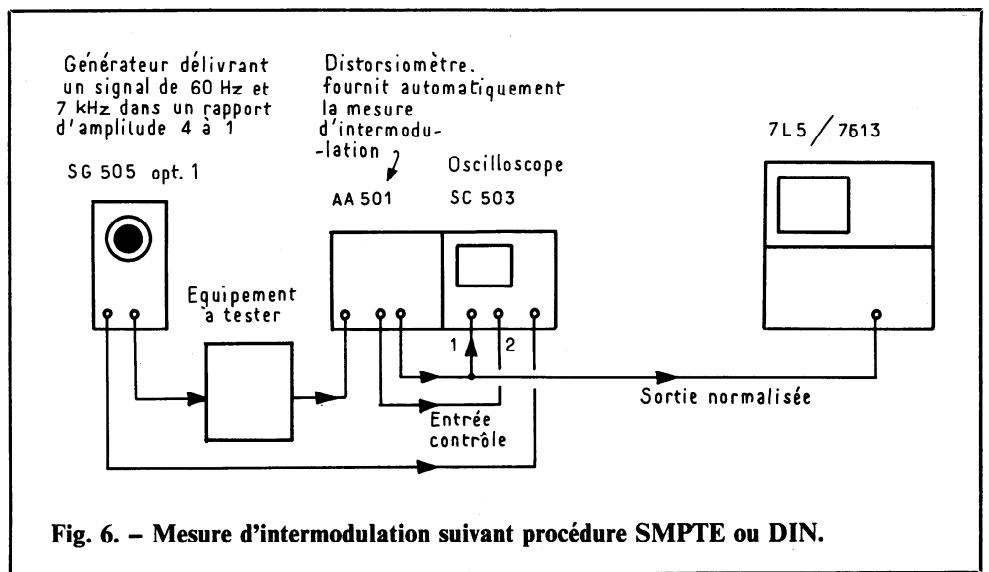


Fig. 6. - Mesure d'intermodulation suivant procédure SMPTE ou DIN.

correcte la mesure doit être réalisée par un dispositif sensible à la valeur efficace vraie. Beaucoup de distorsiomètres mesurent cependant une valeur moyenne, ce qui introduit une erreur). La distorsion harmonique globale est donnée par le rapport entre la tension efficace (vraie) des harmoniques et le fondamental.

$$H \% = 100 \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{H_1}$$

Cette mesure peut être réalisée à partir d'un analyseur de spectre. Chaque composante peut, en effet, être analysée. La dynamique est cependant limitée dans ce cas à 80 ou 90 dB. Un filtre coupe bande peut améliorer ceci de 10 à 20 dB. La mesure est cependant longue car elle nécessite une suite de calculs fastidieux. Le distorsiomètre est une meilleure solution (fig. 2). Cet appareil élimine la fréquence fondamentale et mesure ce qui subsiste, c'est-à-dire les harmoniques et le bruit (le bruit n'est plus négligeable dans le cas de très faible niveau harmonique : < 0,005 %). Le distorsiomètre affiche directement le taux harmonique. Il est nécessaire avec cet appareil de réaliser 2 opérations :

— recherche de la fréquence d'accord du fondamental

— recherche du minimum (avec changement de gamme de tension).

Le distorsiomètre AA501 de Tektronix réalise toutes ces opérations automatiquement et affiche le résultat en numérique, soit en % soit en dB (fig. 3). Les signaux sont disponibles pour visualiser sur un oscilloscope, en mode XY, les harmoniques en fonction du fondamental (maintenu automatiquement à un niveau standard de 1 volt). La figure de Lissajous obtenue, permet d'avoir une indication sur la nature de la non-linéarité existant dans l'équipement.

Ce type de test mettant en œuvre un signal sinusoïdal pur a l'avantage de la simplicité. Par changement de la fréquence fondamentale, il est possible de tester l'ensemble de la gamme. Cependant lorsque cette fréquence fondamentale est voisine de la fréquence de coupure de l'équipement, les mesures deviennent impossibles puisque les harmoniques seront en dehors de la bande passante. Ceci explique en partie le succès rencontré par les méthodes de mesure par intermodulation.

Mesure des produits d'intermodulation

Procédure SMPTE (et DIN)

Cette méthode existe depuis 1930 et utilise deux signaux de test : l'un de basse fréquence (généralement 60 Hz) et l'autre de haute fréquence (7KHz). Ces signaux sont additionnés dans un rapport d'amplitude de 4 à 1. Le signal composite obtenu est appliqué à l'entrée de l'équipement à tester. Les non-linéarités provoquent l'apparition de produits d'intermodulation autour du signal haute fréquence (fig. 4). La mesure consiste à obtenir la valeur quadratique (efficace vraie) des produits d'intermodulation et à exprimer cette valeur en pourcentage du signal HF.

$$hH \% = 100 \frac{\sqrt{H_1^2 + H_2^2}}{HF} \text{ (fig. 4)}$$

Cette mesure peut être effectuée par l'intermédiaire d'un analyseur de spectre, celui-ci montrant directement les différentes composantes fréquentielles. Un autre procédé consiste à filtrer le signal de sortie de l'équipement sous test, afin d'éliminer la composante basse fréquence, un détecteur d'amplitude suivi d'un filtre passe bas, fournit directement l'information cherchée (fig. 5).

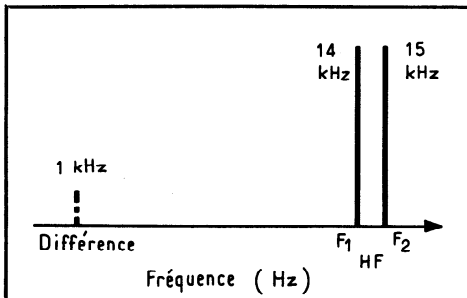


Fig. 7. - Produits d'intermodulation procédure CCIF.

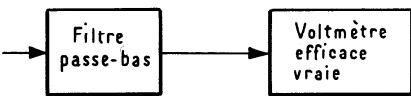


Fig. 8. - Principe de mesure suivant procédure CCIF.

C'est le procédé utilisé dans le distorsiomètre Tektronix AA501.

La fig. 6 montre la composition d'un banc de mesure type. Le générateur utilisé (SG505 de Tektronix) fournit directement le signal composite.

Ce type de test est très sensible aux non-linéarités de raccordement, aux couplages entre circuits et également dans le cas de distorsions apparaissant en basse fréquence.

Ceci est dû au fait que les signaux mesurés sont traduits en haute fréquence où généralement les gains sont plus faibles, la distorsion est donc moins réduite par les boucles de contre-réaction.

L'insensibilité relative de ce test au scintillement le rend très utile dans les applications concernant l'enregistrement de signaux (disque, bande magnétique). Dans le cas de disques, les fréquences utilisées sont de 400 Hz et 4kHz.

Procédure CCIF

Ce type de test met en œuvre 2 signaux HF voisins en fréquence (fig. 7). Les non-linéarités provoquent l'apparition de produits d'intermodulation correspondants aux multiples de la différence des 2 fréquences (soit dans le cas de la fig. 7, 1KHz, 2KHz, etc.) ainsi que d'autres produits de fréquence proche des signaux de test (2F1-F2, 2F2-F1, 3F1-2F2, 3F2-2F1, etc.).

Les non-linéarités de type assymétrique (ou paires) provoquent l'apparition des produits d'intermodulation BF, tandis que des non-linéarités symétriques provoquent l'apparition des produits HF. Généralement, seules les composantes BF sont mesurées. Le principe utilisé consiste à filtrer le signal de sortie

(passe bas) de l'équipement sous test afin d'accéder au signal cherché (fig. 8).

L'appareillage nécessaire est représenté sur la fig. 9. Les résultats obtenus par ce type de test donnent une bonne indication de ce que l'oreille entend. La volution des deux fréquences utilisées a été proposée afin d'étudier les effets des distorsions transitoires. L'amplitude de variation de la valeur des mesures avec la fréquence ainsi que de la fréquence à laquelle ce changement intervient est utile pour distinguer les distorsions statiques des distorsions dynamiques.

L'autre avantage de ce test est d'être utilisable dans les systèmes à bande étroite.

D'autres auteurs ont proposé une modification de ce test en ajoutant une 3^e fréquence de façon à ce que les composantes d'ordre pair et impair soient traduites en basse fréquence. Toutes les informations pourraient donc être obtenues par simple filtrage (fig. 10).

Nota : fréquences proposées : 9 kHz, 10,05 kHz, 20 kHz. La composante impaire sera à 950 Hz, la composante paire à 1,05 kHz. Il ne peut y avoir d'annulation des 2 composantes. Un filtrage énergique permet d'accéder au signal à mesurer (passe bande à 1 kHz).

Test sinus-carré

Ce test est destiné aux mesures de distorsion transitoires (TIM).

Il consiste à additionner un signal sinusoïdal 15kHz à un signal carré de 3,18kHz. Le signal composite est appliqué à l'entrée de l'équipement à tester. Le signal de sortie est filtré par filtre passe bas 30kHz (DIM 30) ou 100kHz (DIM100). Les composants d'intermodulation sont mesurés à l'aide d'un analyseur de spectre. Leur somme quadratique exprimée en pourcentage du signal 15kHz fournit l'information cherchée. Le spectre du signal composite est représentée sur la fig. 11.

Le signal carré délivré doit absolument avoir un rapport cyclique de 50 % de façon à éviter toutes les harmoniques paires (puisque certains produits d'intermodulation apparaissent à ces fréquences).

Ce type de test ne fournit guère d'information sur les mécanismes responsables des distorsions (équipement de test représenté sur fig. 12).

Test pour signal rampe

Lorsqu'un signal de type « Rampe » est appliqué à l'entrée d'un circuit possédant des non-linéarités en vitesse de variation de tension de sortie $\frac{(dV)}{(dt)}$ les variations rapides de la

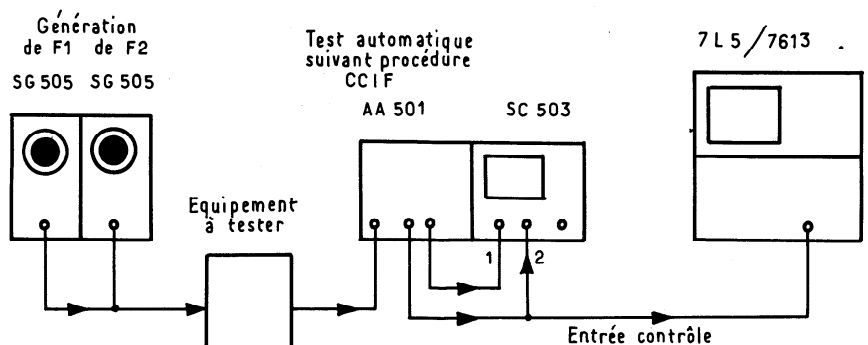


Fig. 9. - Equipement pour test suivant procédure CCIF.

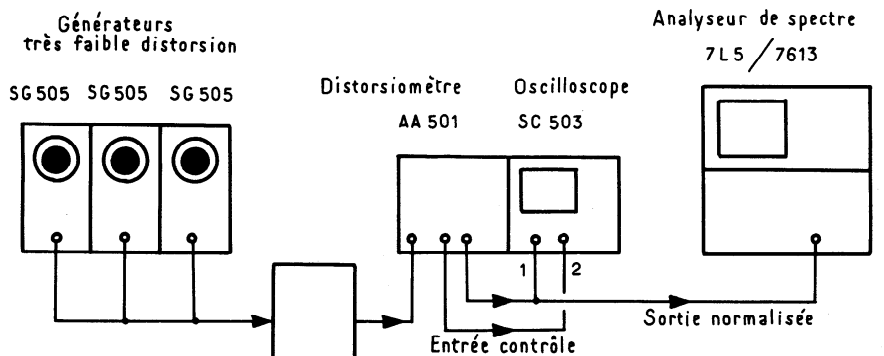


Fig. 10. - Test d'intermodulation 3 tons.

rampe seront déformées. Ceci produit un décalage de la tension continue en sortie de ce circuit. Si la polarité de la rampe est changée, la polarité de ce décalage change. En inversant donc périodiquement (basse fréquence) la phase de la rampe, le signal de sortie contiendra un signal carré à la fréquence du changement de phase et dont l'amplitude est représentative de distorsions. Un filtre passe haut doit généralement être inséré entre l'entrée du système à tester et le générateur. Les fréquences couramment utilisées sont de 20 kHz pour la rampe 40 Hz pour la commutation de phase (fig. 13).

L'information obtenue est égale à :

$$V = \frac{A2f}{VV}$$

V = valeur du signal carré de « distorsion »

A = amplitude de la rampe

f = fréquence de la rampe

VV = vitesse de variation maximum du circuit testé ($\frac{dV}{dt}$ limite)

soit en normalisant par la valeur de la rampe

$$V = \frac{Af}{VV} \text{ (distorsion)}$$

Les mesures ont été réalisées sur chacun des circuits précédents sui-

vant chacune des méthodes décrites.

L'importance des informations obtenues ne permet pas de les montrer ici.

Toutes ces méthodes de mesure ont été testées avec les appareils Tektronix suivants :

— générateur SG505 (10 Hz à 110Hz - THD - 102 dBm signal SMPTE disponible)

— distorsiomètre automatique AA501 (10Hz à 110KHz-THD-0,0025 % test SMPTE-DIN-CCIF automatique)

— oscilloscope SC503 2 voies 10 MHz à mémoire

— analyseur de spectre à mémoire numérique (7L5 - 5 MHz, mode lin 2 dB, 10 dB div.)

— 7 603 châssis oscilloscope 100 MHz à mémoire avec affichage des paramètres de mesure.

Conclusion

Parmi toutes les méthodes citées, celles concernant le taux harmonique global ainsi que les mesures d'intermodulation (CCIF, DIN, SMPTE) sont parmi les plus employées et donnent les meilleurs résultats.

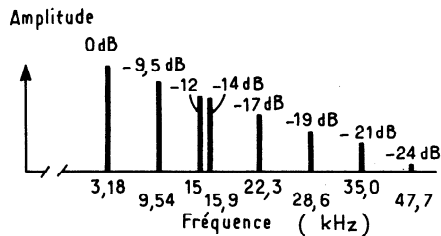


Fig. 11. - Spectre du signal composite (sinus-carré) DIM 100.

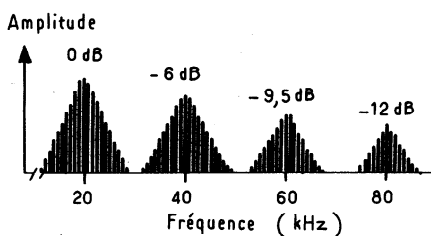


Fig. 12. - Equipement pour test sinus-carré.

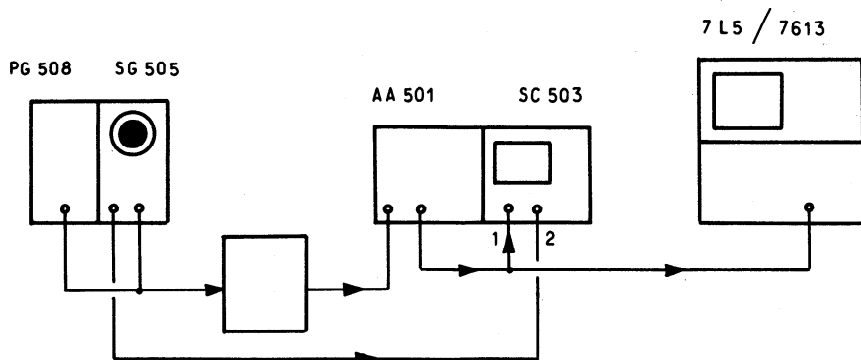


Fig. 13. - Spectre du signal rampe à commutation de phase.

Informations - Informations - Informations

SUPPLEMENT SPECIAL MESUCORA

(10 000 exemplaires distribués aux visiteurs du salon)

dans notre NUMERO de DECEMBRE

TOUTE L'ELECTRONIQUE 49, rue de l'Université 75007 Paris

Informations - Informations - Informations