

L'analyse spectrale : un moyen puissant d'investigation

par Y. Pacheu

Il y a quelques dizaines d'années l'analyseur de spectre, appelé récepteur panoramique, n'était guère qu'une curiosité de laboratoire. L'introduction il y a dix ans environ d'analyseurs calibrés en amplitude a été à l'origine d'un essor prodigieux de ce type d'appareils et c'est ainsi qu'aujourd'hui l'analyseur de spectre est probablement l'outil le plus puissant de l'industrie électronique.

L'analyse spectrale n'en est cependant qu'à ses débuts, ceci étant dû non pas aux capacités des analyseurs actuels, mais plutôt à une méconnaissance de ce type d'appareils et de leurs possibilités.

L'oscilloscope, outil de base en laboratoire, nous montre l'évolution de l'amplitude d'un signal en fonction du temps, domaine qui nous est naturel et familier (fig. 1 a). L'analyseur de spectre, par contre, nous montre cette même évolution en fonction de la fréquence (fig. 1 b), notion relativement déroutante pour l'esprit et qui a sans doute été le principal facteur limitant l'emploi

des analyseurs indépendamment de leur ancienne complexité et de leur prix. Ces deux types de représentation du même phénomène : domaine du temps pour l'oscilloscope, domaine de la fréquence pour l'analyseur de spectre ne sont pas indépendants. En effet, si l'un des deux est connu, une transformation mathématique appropriée conduit à l'autre (fig. 2).

Nous ne parlerons pas ici des méthodes qui s'appuient sur l'utilisation de calculateurs pour obtenir, par exemple, en faisant appel à la transformation de Fourier, le spectre d'un signal connu dans le domaine du temps, mais nous nous attacherons plutôt aux méthodes analogiques permettant d'obtenir le même résultat.

Principe de fonctionnement

Fondamentalement, un analyseur de spectre est un dispositif qui décompose (ou sépare) un signal complexe

en ses différentes composantes fréquentielles (fig. 3). On pourrait imaginer un analyseur de spectre très simple, constitué par un groupe de filtres (de largeur B), dont les fréquences centrales seraient placées de telle sorte que l'ensemble de ces filtres couvre la bande de fréquence à observer. Ce dispositif séparerait d'autant mieux des composantes voisines en fréquence que les filtres (B) seraient plus étroits. Cette grandeur caractéristique, (B) permettant de discriminer ainsi des signaux voisins, est appelée « résolution ». La bande de fréquence observée sera dans ce cas égale à nB , n étant le nombre de filtres. nB en terme d'analyse spectrale est appelée « dispersion » (fig. 4).

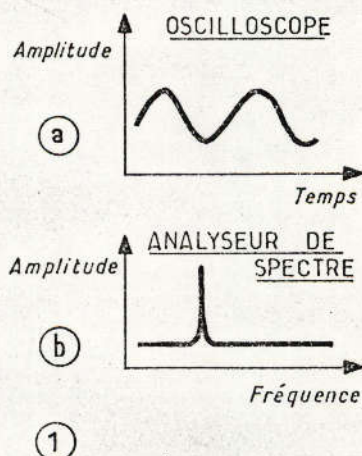
Cependant, les limites d'un tel système sont vite atteintes dès qu'il s'agit, par exemple d'augmenter la résolution et la dispersion, le nombre de filtres nécessaires devenant rapidement prohibitif. La technique couramment employée dans les analyseurs de spectres existant est celle du superhétérodyne. Dans ce principe, le filtre (de bande B) est à une fréquence fixe (F_{IF}). La fréquence du signal à mesurer (F_{RF}) est traduite à la fréquence F_{IF} par battement, dans un mélangeur, avec un oscillateur local (F_{OL}) à fréquence variable. En sortie du mélangeur, on trouvera les résultats du battement, soit : $F_{OL} + F_{RF}$; $F_{OL} - F_{RF}$; $F_{RF} - F_{OL}$.

L'analyseur est conçu pour ne recevoir et ne visualiser que l'une d'entre elles. En prenant par exemple $F_{IF} > F_{RFmax}$ et en plaçant à l'entrée de l'analyseur un filtre passe-bas de fréquence de coupure F_{RFmax} , l'analyseur ne recevra que $F_{OL} - F_{RF} = F_{IF}$.

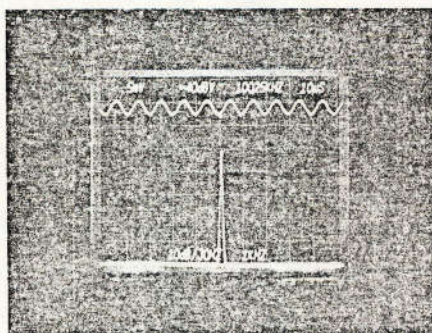
Le déplacement linéaire de la fréquence de l'oscillateur local de F_{OL1} à F_{OL2} permet d'observer une bande de fréquence $F_{RF1} = F_{OL1} - F_{IF}$ à $F_{RF2} = F_{OL2} - F_{IF}$.

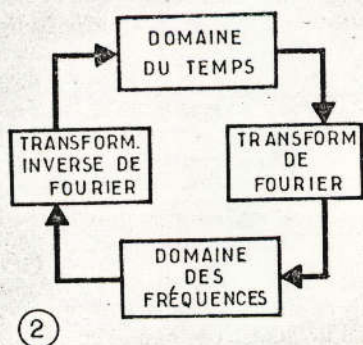
Ceci revient en fait, en apparence, à déplacer la fréquence centrale du filtre (B) dans la bande de fréquence à observer (fig. 5), réalisant ainsi une sorte d'échantillonnage.

La vitesse de déplacement de ce filtre n'est pas indépendante de la résolution et de la dispersion; ces trois paramètres sont liés par une loi mathématique. Les filtres ont, en effet, une constante de temps d'autant plus grande qu'ils sont plus étroits; il leur faut donc un certain temps pour fournir la pleine amplitude des signaux qu'ils reçoivent. Cela signifie que la variation par unité de temps de la fréquence correspondant au déplacement apparent du filtre ne doit pas être trop grande (vitesse de balayage).



1. — Différences entre la représentation d'un signal par l'oscilloscope (a) et par l'analyseur de spectre (b); visualisation sur l'écran (c).





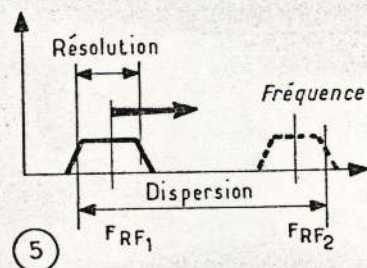
2. — Relation entre le domaine du temps et celui des fréquences.

3. — L'analyseur de spectre décompose un signal complexe en ses différentes composantes fréquentielles (a). Signal composite (b).

4. — La résolution est la grandeur permettant de discriminer des signaux voisins; la dispersion représentant la bande de fréquence observée (a). Bande passante des filtres (b).

5. — Par la variation linéaire de la fréquence de l'oscillateur local, on obtient, en apparence, un déplacement de la fréquence centrale du filtre dans la bande de fréquence à observer.

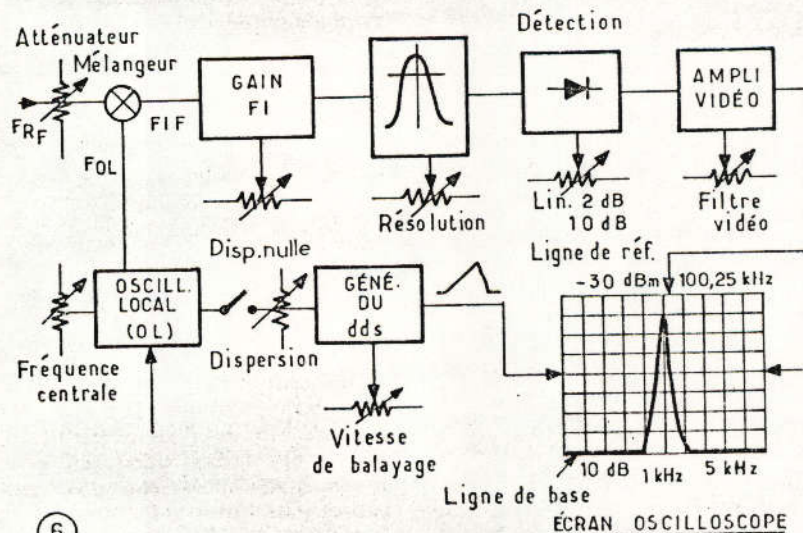
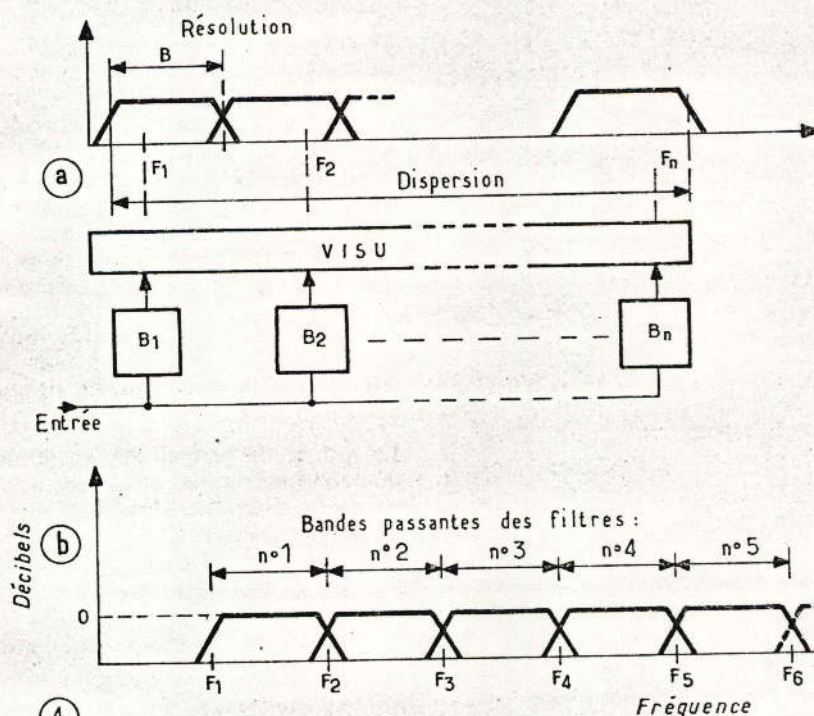
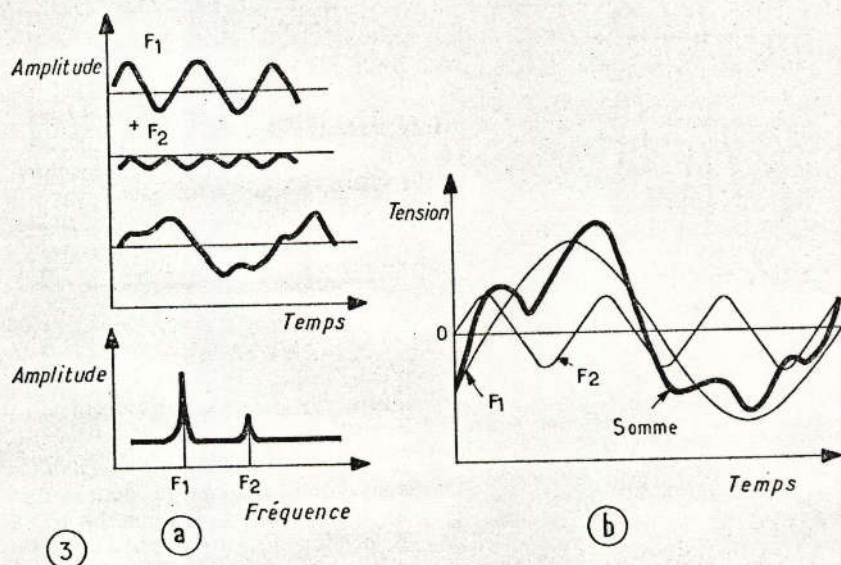
6. — Schéma synoptique d'un analyseur de spectre.



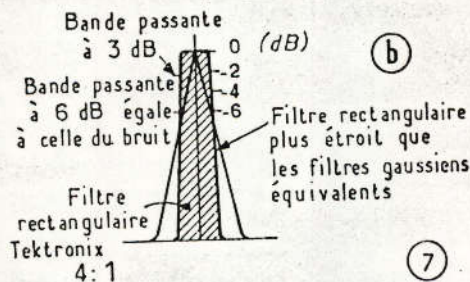
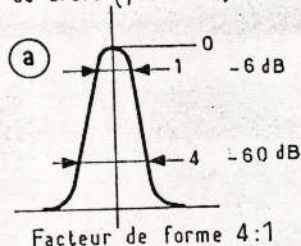
Fort heureusement, la plupart des analyseurs récents signalent cette éventuelle incompatibilité, ou mieux, certains corrigent leur résolution (5L4N par exemple). De plus, parfois la vitesse de balayage aussi est corrigée, de façon à optimiser ces paramètres (7L5).

Cependant, dans le cas d'analyse spectrale à très haute résolution (par exemple avec le 7L13, 30 Hz à 1,8 GHz) la vitesse de balayage doit malgré tout être lente ce qui implique l'utilisation d'oscilloscopes à mémoire, à moins que l'analyseur ne possède sa propre mémoire (exemple : 7L5).

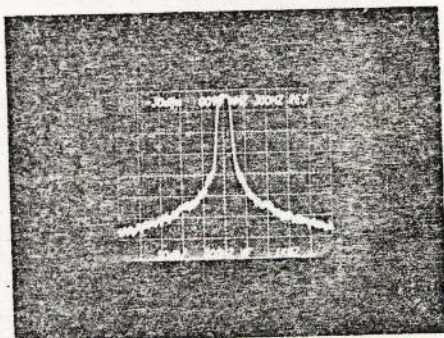
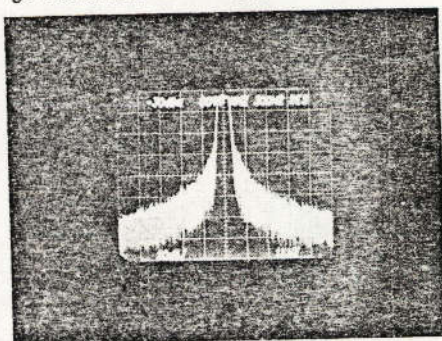
On voit d'ailleurs tout l'avantage que présente la solution de l'oscilloscope à tiroirs, qui peut fonctionner aussi bien dans le domaine du temps que dans celui de la fréquence, selon la nature des tiroirs utilisés (certains appareils peuvent d'ailleurs fonction-



Bande passante
égale aussi à la bande
de bruit (puissance)



7. — Définition du facteur de forme (a); Comparaison entre le facteur de forme du filtre rectangulaire étroit Tektronix et celui du filtre gaussien généralement utilisé (b).



8. — L'emploi de filtres video permet de réduire ou de supprimer le bruit de fond pouvant exister au niveau de la ligne de base : (a) : sans filtre; (b) : avec filtre.

ner simultanément et indépendamment dans les deux domaines : exemple : 7904).

Comment utiliser l'analyseur

Examinons maintenant le schéma synoptique très simplifié d'un analyseur et voyons surtout le rôle des différentes commandes (fig. 6). Pour observer la bande de fréquence intéressante, nous disposons (échelle horizontale) :

- D'une commande de fréquence centrale (agit sur l'oscillateur local).

Cette fréquence correspond à la verticale centrale de l'écran.

- D'une commande de dispersion (agit sur l'amplitude de la dent de scie appliquée à l'oscillateur local). La dispersion définit l'amplitude de l'excursion en fréquence de l'oscillateur local. L'échelle horizontale de l'écran sera graduée en Hz, kHz ou MHz. La finesse de l'analyse sera définie par la commande de résolution, qui permettra la sélection du filtre d'analyse.

- La forme de ces filtres a une grande importance; il faut donc la définir. Un filtre parfait serait infiniment étroit. Le filtre carré se rapproche de cette solution idéale, c'est donc la forme vers laquelle doivent tendre les filtres d'analyse (fig. 7). Un filtre ayant un très faible facteur de forme (étroit) permettra de visualiser de faibles signaux, situés près de signaux beaucoup plus forts.

Le réglage de l'amplitude, en termes d'analyse spectrale, du niveau de référence (sommet de l'écran) est réalisé par (échelle verticale) :

- L'atténuateur placé en tête de l'analyseur (de façon à conditionner le signal pour éviter de surcharger ou détruire le mélangeur). Cet atténuateur est gradué en décibels.

- La commande de gain (située dans les étages à fréquence intermédiaire). Cette commande est aussi graduée en décibels.

Ces deux commandes, souvent couplées, définissent le niveau de référence (en dB).

- La détection linéaire ou logarithmique définira l'échelle verticale (volts, 2 dB, 10 dB/Div).

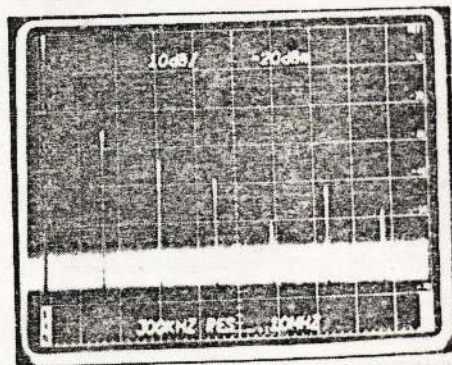
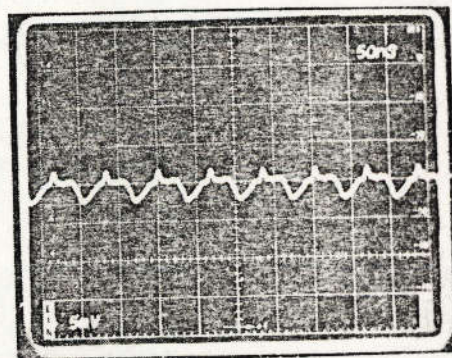
- La commande de vitesse de balayage (analogue à la base de temps d'un oscilloscope) fixera la récurrence de l'analyse.

L'amplificateur video permettra ensuite l'attaque des plaques de déflexion du tube cathodique. Il est d'ailleurs possible d'insérer dans cet amplificateur des filtres video (en général réseaux RC passe-bas du premier ordre). Ces filtres video sont destinés à réduire ou éliminer le bruit qui

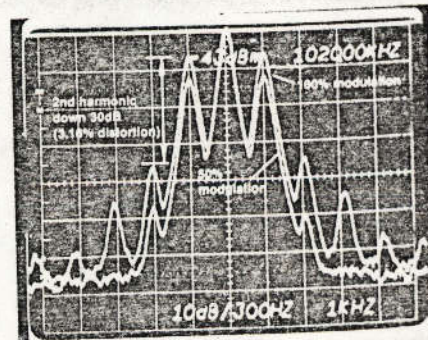
pourrait exister au niveau de la ligne de base (fig. 8).

Applications

L'industrie des télécommunications a été la première à tirer parti des analyseurs de spectre et c'est bien entendu dans ce domaine que les applications sont les plus nombreuses. Cependant, cet appareil peut être utilisé dans bien d'autres cas, qui pourront ainsi être mieux ou plus efficacement résolus. Voici, présentées brièvement, quelques applications :



9. — Mesure de distorsion; (a) : domaine du temps; (b) domaine de la fréquence.



10. — Mesure de la distorsion d'une onde modulée en amplitude à 50 et à 100 %.

Mesure de distorsions

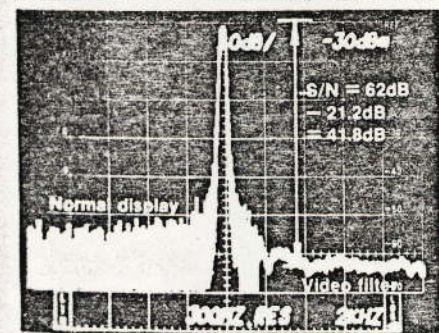
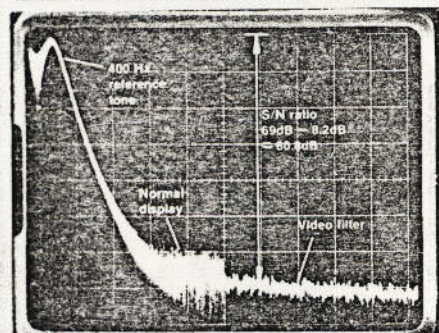
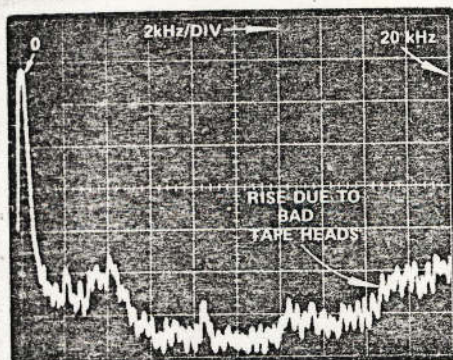
• **Domaine du temps et domaine de la fréquence.** Un exemple de mesure de distorsion dans le domaine du temps et dans le domaine de la fréquence est donné figures 9 (a) et 9 (b). Les données figurant sur l'écran sont les suivantes :

- résolution : 300 kHz;
- dispersion : 10 MHz/Div (horizontal);
- mode : 10 dB/Div (vertical);
- niveau de référence : - 20 dBm.

Nota : la distorsion globale est la moyenne quadratique des différentes harmoniques.

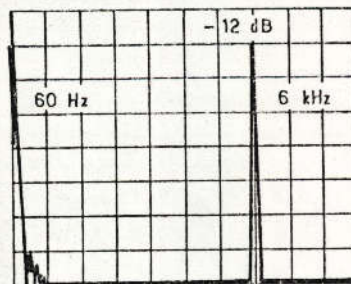
• **Mesure de la distorsion d'une onde modulée en amplitude (50 % et 100 %).** Cet exemple est représenté en figure 10.

Données sur l'écran :



12. — Mesures de bruits : rapport signal/bruit pour un signal BF issu d'une tête magnétique (a); rapport signal/bruit d'un signal BF (b) et d'un signal HF (c).

EMI 222 S/1-6-76



11

a

11. — Mesure d'intermodulation; en (a) : sortie du générateur (condition de mesure) SG 502; en (b) : produit d'intermodulation du deuxième ordre.

- résolution : 300 Hz;
- dispersion : 1 kHz/Div;
- mode : 10 dB/Div;
- niveau : - 43 dBm;
- fréquence centrale : 1020,00 kHz.

• **Mesure d'intermodulation (fig. 11 (a) et (b)).**

— Intermodulation du 2^e ordre dans un amplificateur haute fidélité ($F_1 = 60$ Hz) ($F_2 = 6$ kHz) ($F_2 - F_1$ et $F_2 + F_1$).

— Intermodulation du 3^e ordre (mesure de la qualité d'un émetteur) ($2F_2 - F_1$ et $2F_1 - F_2$).

Mesure de bruit

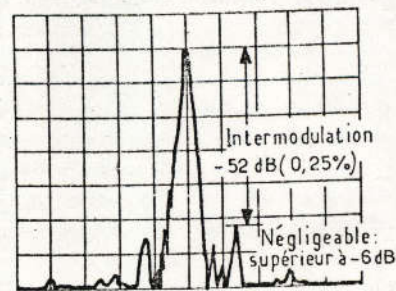
La mesure de bruit s'effectue en distinguant les deux types de bruit : impulsionnel ou aléatoire, l'analyseur de spectre permettra de faire les mesures courantes dans ce domaine.

La figure 12 (a) illustre la mesure du rapport signal/bruit pour un signal BF issu d'une tête magnétique, les figures 12 (b) et 12 (c), le rapport signal/bruit d'un signal BF et d'un signal HF. Il faut, dans cette mesure, tenir compte, pour la bande de bruit à mesurer, de la résolution de l'analyseur : facteur correctif

$$= 20 \log \frac{\text{bande utilisée (résolution)}}{\text{bande}}$$

Mesures sur signaux périodiques

- fréquence;
- dérive (fig. 13).
- dérive d'un oscillateur; la très haute stabilité du 7L5 associée à sa mémoire numérique permettent une mesure aisée des dérives (max hold);
- mesure précise de la fréquence de 2 sinusoides en utilisant la position « balayage manuel » (fig. 14); (mesure

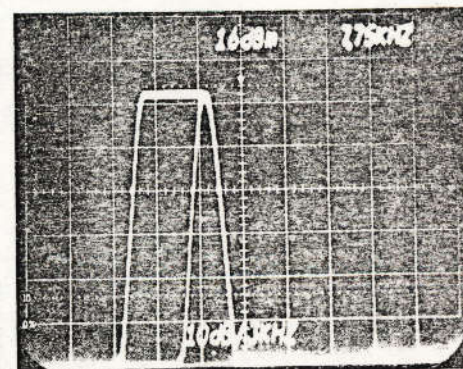


b

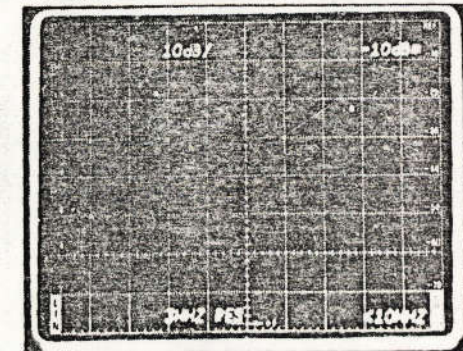
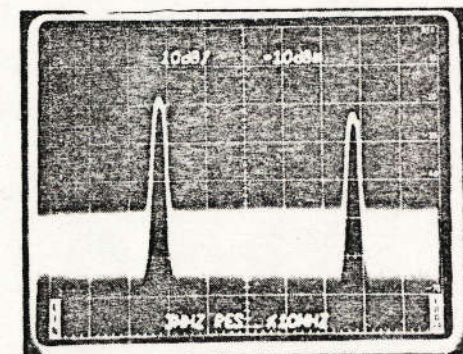
des oscillateurs locaux pour F_1 et F_2 par fréquencemètre extérieur — voir aussi tracking).

Ondes périodiques modulées

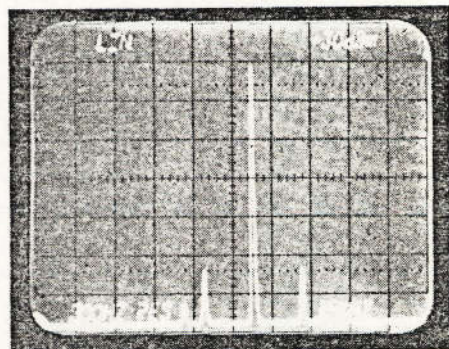
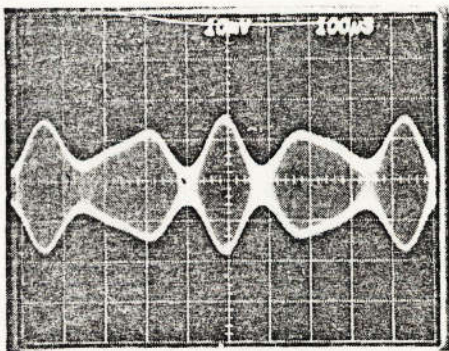
- **Modulation d'amplitude** — modulation d'amplitude (par plusieurs fréquences) (fig. 15) :



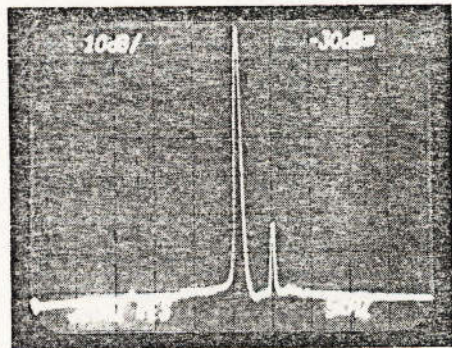
13. — Mesure sur signaux périodiques.



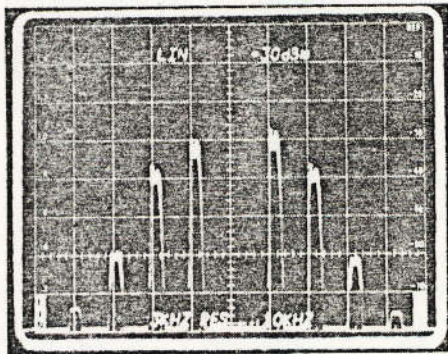
14. — Mesure précise de la fréquence de deux sinusoides en utilisant la position « balayage manuel ».



15. — Mesure en modulation d'amplitude; domaine du temps (a); domaine de la fréquence (b).



16. — Mesure en BLU (modulation à 5 kHz).



17. — Mesure de l'excursion en modulation de fréquence (porteuse nulle).

$$0\% \text{ de mod } m = \frac{2 A_s}{AC} \rightarrow \text{modulante}$$

— pour la modulation à 6 kHz :

$$\frac{2(1,5)}{6,8} \approx 45\%$$

— pour la modulation à 9 kHz :

$$\frac{2(0,6)}{6,8} \approx 18\%$$

• Modulation BLU (bande latérale unique) (fig. 16) : la modulation à 5 kHz est à -52 dB de la porteuse

$$\left(\text{soit } \frac{AS}{AC} = 0,0025; \quad m = 0,5\%; \right.$$

$$\left. \text{en } \log m = 10 \left(\frac{-52 + 6}{20} \right) \right)$$

• Modulation de fréquence

— Mesure de l'excursion (porteuse nulle) (fig. 17). Les tables de Bessel donnent pour le 1^{er} zéro de la porteuse : $J_0 = 2,4$

$$\frac{\Delta F}{f} = 2,4 \quad f = 10 \text{ kHz}$$

$$\text{d'où } \Delta F = 10 \times 2,4 = 24 \text{ kHz.}$$

Pour le 2^e zéro de J_0 index = 5,5

$$\frac{\Delta F}{f} = 5,5 \text{ d'où } \Delta F = 55 \text{ kHz}$$

(fig. 18).

— Modulation FM large bande (fig. 19). Pour connaître f dans ce cas, on utilise l'analyseur de spectre en dispersion nulle (fig. 20). L'analyseur de spectre montrera donc le signal BF démodulé dans le domaine du temps ($f = 100 \text{ Hz}$).

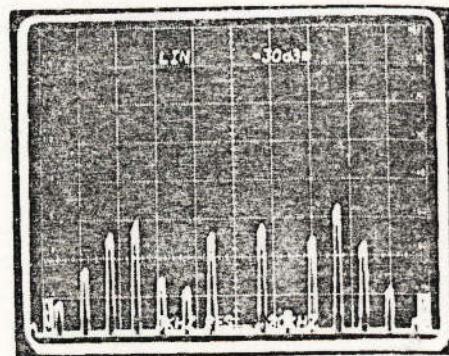
• Interférences : effet d'un signal de -5 dB (par rapport à la porteuse) sur une image TV (fig. 21 et 22).

Ondes pulsées

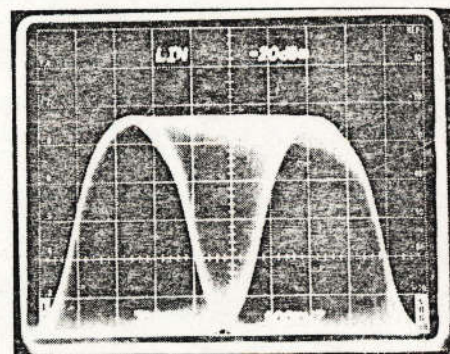
Dans les radars, par exemple on rencontre de telles formes d'onde (forme générale : $\frac{\sin x}{x}$). Les informations intéressantes sont : fréquence de la porteuse, largeur d'impulsion, fréquence de répétition, forme de l'enveloppe de l'onde, bande de fréquence occupée, % d'impulsion manquante, rapport cyclique de l'émission, présence de AM, FM, etc.

Dans le cas de la figure 24 un rapport de 13,2 dB entre le lobe principal et le lobe latéral indique une impulsion de forme carrée (rapport $\frac{6,8}{1,5}$ = $A \log A \approx 13 \text{ dB}$).

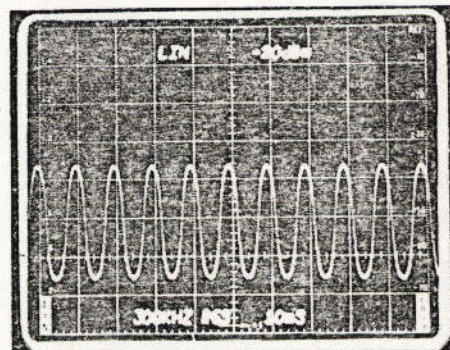
La largeur d'un lobe est de 1 MHz la durée de l'impulsion $T_0 = \frac{1}{10^6}$ = 1 μs . La distance (en temps) entre les lignes verticales donne la période de modulation, soit 500 $\mu\text{s/div}$ et



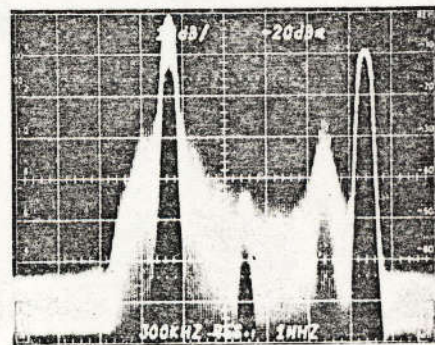
18. — Mesure de l'excursion pour le deuxième zéro de la fréquence.



19. — Modulation FM en large bande. On note une partie intense au centre de l'image.



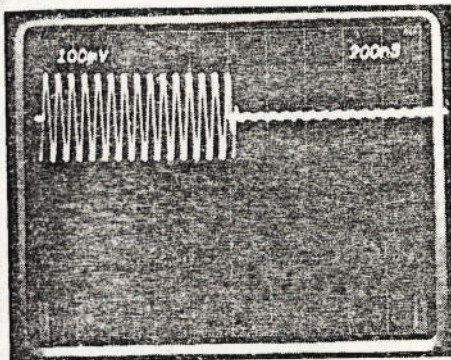
20. — Mesure en FM en dispersion nulle.



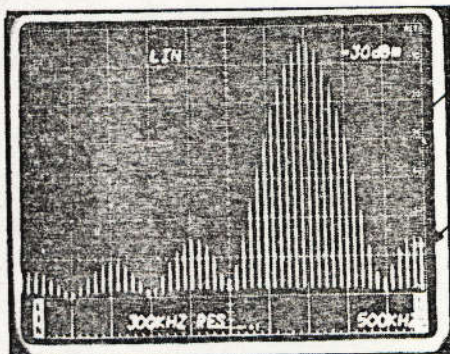
21. — Signal TV avec un signal d'interférence de -50 dB.



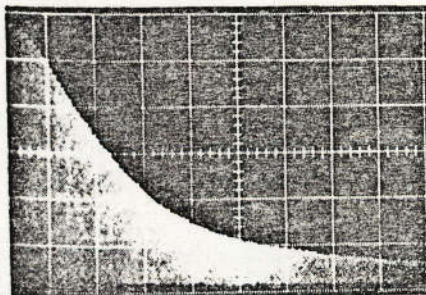
22. — Image TV avec un signal d'interférence de -50 dB relative à la figure précédente.



23. — Ondes pulsées, domaine du temps.

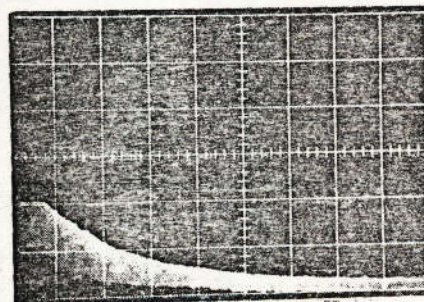
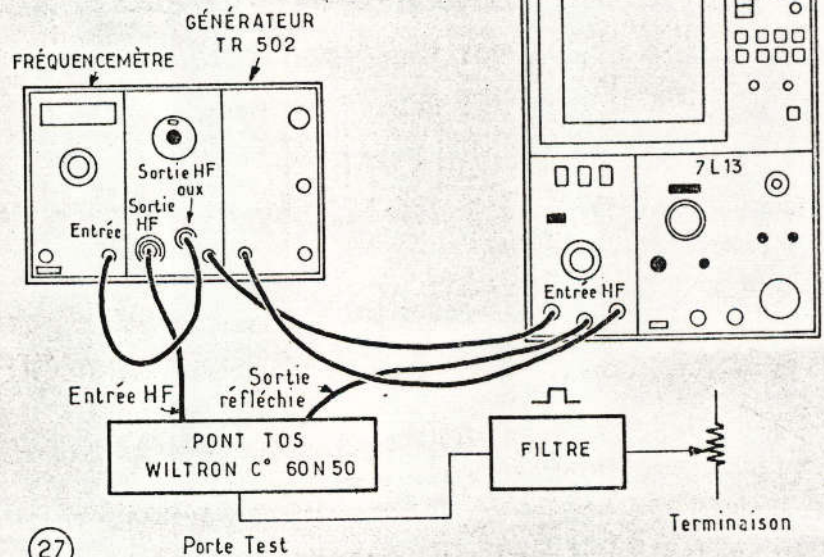


24. — Ondes pulsées, domaine de la fréquence.



25. — Rayonnement d'un transformateur non blindé.

EMI 222 S/1-6-76



26. — Rayonnement d'un transformateur blindé.

5 lignes/div, la période est donc de 100 μ s. La fréquence centrale, dans ce cas, valant 14 MHz, la porteuse (centre du lobe principal) est de 15 MHz.

Note : dans ce type d'analyses, on utilise un filtre (résolution) dont la largeur doit permettre d'observer le maximum de détails du spectre : soit résolution $B \leq \frac{0,1}{t_0}$ et $B >$ fréquence de récurrence de l'impulsion. Il faudra, d'autre part, tenir compte d'une perte de sensibilité de l'analyseur (α).

$$\alpha \text{ dB} = 20 \log t_0 B$$

t_0 = largeur de l'impulsion

B = résolution

(pour un filtre carré Tektronix).

Ici, la porteuse est, en réalité, à $\alpha \text{ dB} = 20 \log 10^{-6} \cdot 3,10^5 = -10,4 \text{ dB}$

d'où

$$P_{\text{HF}} = -30 \text{ dB} + 10,4 = -19,5 \text{ dBm}$$

27. — Utilisation conjointe d'un générateur et d'un analyseur pour le tracé de courbes de réponses d'amplificateurs, de filtres, etc.

L'analyseur peut également servir à la mesure de champ électromagnétique (associé à une antenne calibrée). Rayonnement d'un transformateur non blindé (fig. 25), avec blindage (fig. 26) (signal pris à partir d'une antenne formant une boucle magnétique).

Très importante également est l'application qui consiste en l'utilisation conjointe d'un générateur (tracking) et d'un analyseur (fig. 27). Cette association permettra le tracé de courbes de réponses d'amplificateurs, filtres, etc. et ceci avec une dynamique beaucoup plus importante qu'avec l'analyseur seul (de l'ordre de 110 dB jusqu'à 1,8 GHz).

A cet ensemble on pourra associer un fréquencesmètre qui permettra de connaître avec précision la fréquence d'un point particulier de la courbe tracée — point surbrillant sur l'écran — (fig. 28, 29 et 30).

Ces quelques exemples illustrent bien la souplesse et les immenses possibilités de l'analyseur de spectre. L'utilisation d'un analyseur est désormais chose simple; quant aux performances, elles sont bien souvent supérieures à celles de n'importe quel autre système.

Y. PACHEU

Documentation Tektronix et Artech (Spectrum analyser Theory and Application)