

L'analyseur de spectre en mesure de bruit

par Y. PENARGUEAR (*)

Les besoins en mesure de bruits sont aussi universels que l'existence du bruit lui-même. Que ce soit des mesures de rapport signal sur bruit, de mesures de pureté spectrale, de bruit sur les systèmes de télécommunications, dans tous les cas le but est toujours le même : mesurer la puissance de bruit ou sa distribution en fonction de la fréquence. L'analyseur de spectre constitue un instrument idéal pour de telles mesures, c'est ce dont nous allons nous entretenir dans les lignes qui suivent.

Le bruit

Le bruit devient le signal électrique lorsque :

- il n'y a pas de porteuse (signal électrique de la forme $f = A \sin \omega t + \phi$) ;
- les niveaux des porteuses ne sont pas négligeables face au niveau de bruit.

Dans les mesures le bruit est traité comme un signal puisqu'il remplit les mêmes critères. Il peut transférer une énergie, il peut être amplifié et il peut perturber ou interférer avec les autres signaux électriques.

Les sources de bruit sont essentiellement de deux sortes, l'agitation thermique des particules au-dessus de 0°K souvent qualifié de bruit aléatoire, et les phénomènes électriques transitoires tels que l'allumage des moteurs à explosion, les circuits d'allumage des éclairages fluorescents... dont la caractéristique est la variation en fonction du temps et qui constituent le bruit impulsionnel.

Ces deux classifications vont entraîner deux types de mesures incompatibles entre elles, ce qui complique quelque peu l'analyse.

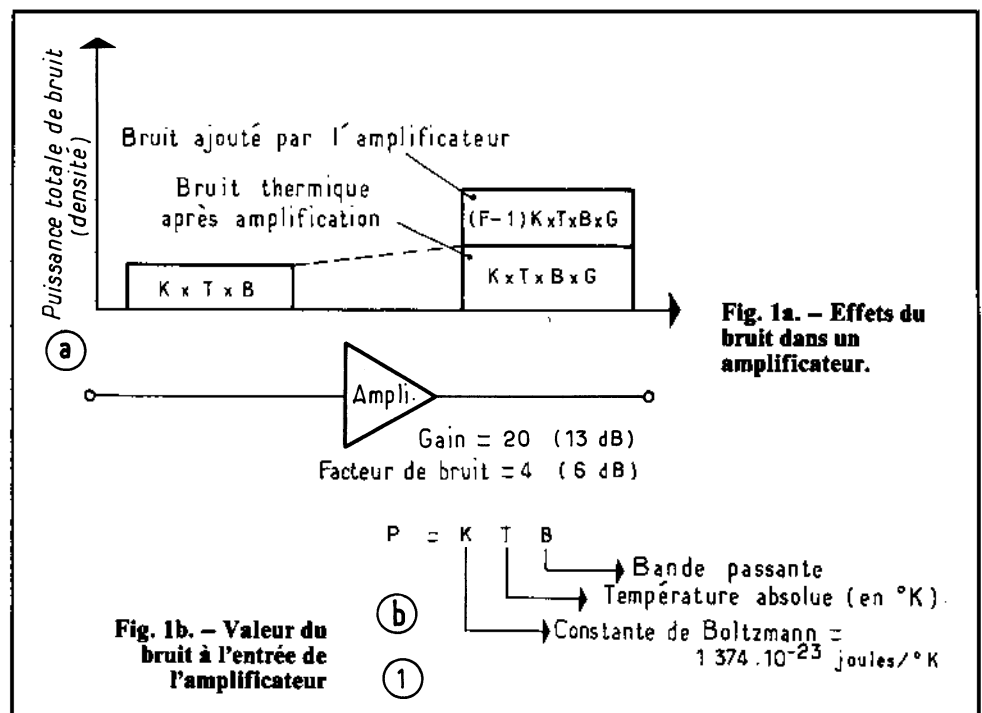
Bruit aléatoire

Le bruit aléatoire (bruit thermique, bruit blanc) possède les caractéristiques suivantes :

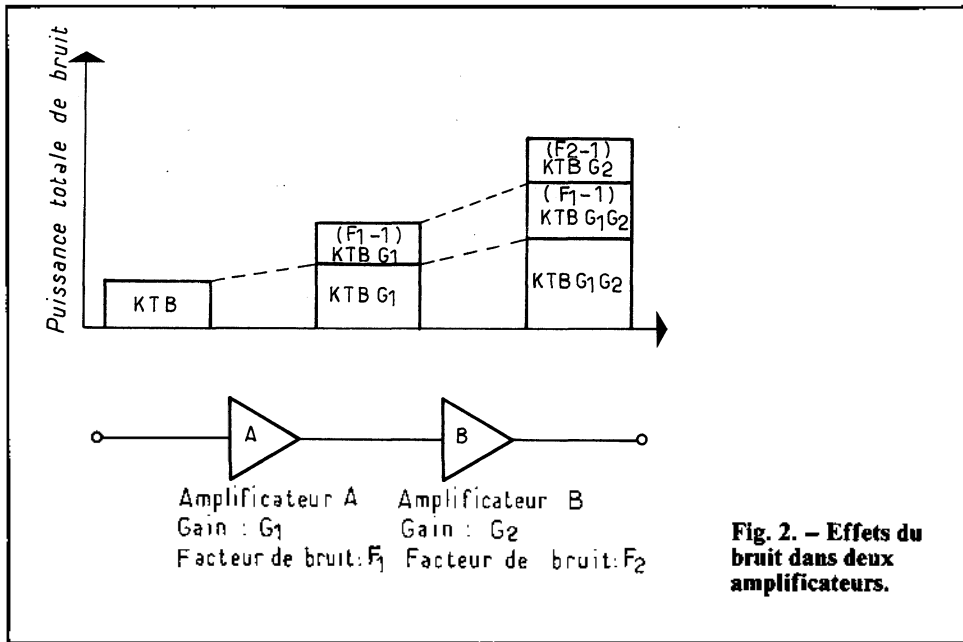
- les composantes sont aléatoires en amplitude et en phase ;
- les mesures sont statistiques ;

- lorsque la bande passante d'analyse double, la puissance de bruit mesurée double (mais non la tension).

Le bruit aléatoire est mesuré en puissance par unité de bande passante ex. : dBm/Hz ou dBm/kHz ou mW/Hz.



(*) Ingénieur de la société Tektronix.



Pour effectuer ces mesures, un certain nombre de facteurs vont devoir être pris en compte :

- détermination de la bande passante équivalente en bruit du filtre de résolution ;
- le choix du filtre de résolution dépendra du type de mesure à effectuer : rapport signal/bruit ;
- un bruit aléatoire occupant une bande de fréquence étendue limite la dynamique d'entrée de l'appareil, ce qui impose l'utilisation d'atténuateurs à l'entrée pour éviter la saturation ou la compression au niveau du premier mélangeur.

Les effets du bruit dans un amplificateur sont exposés dans la figure 1a.

A l'entrée de l'amplificateur, nous trouvons un bruit dont la valeur est donnée fig. 1b.

Au-dessus de 0 °K nous trouvons du bruit et à 20 °C pour une bande passante de 1 MHz, le calcul donne :

$$P_{\text{bruit}} = -115 \text{ dBm}$$

En sortie de l'amplificateur, nous trouvons le bruit d'entrée $\times G$ (gain de l'amplificateur) + la quantité de bruit généré par l'amplificateur lui-même.

$$\text{Bruit en sortie} = \text{KTB} + (\text{KTB} \cdot G) \cdot (F - 1)$$

où F = facteur de bruit de l'amplificateur.

$$F = \frac{S/\text{bruit entrée}}{S/\text{bruit sortie}} = \frac{1}{\frac{\text{KTB}}{1 \cdot G} \cdot \text{KTB} \cdot F \cdot G}$$

Dans le cas de deux amplificateurs ou plus, le facteur de bruit total devient :

$$F_{\text{total}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 \times G_2} + \frac{F_n - 1}{G_1 \times G_2 \times G_{n-1}}$$

On s'aperçoit que le facteur de bruit total est surtout lié au premier étage puisque les facteurs de bruit des autres étages sont divisés par le gain des étages précédents.

Mesure du niveau de bruit

Calcul de la bande de bruit du filtre

Nous n'exposerons que la méthode graphique, étant entendu que par calculateur de nombreuses autres possibilités sont offertes.

Le signal visualisé sur l'écran est la réponse en tension du filtre (voir fig. 3). Il nous faut la réponse en puissance, donc, sur papier millimétré, il s'agit de reporter la courbe A au carré puis d'évaluer la surface sous la courbe et en tirer la largeur d'un rectangle qui aurait la même amplitude (voir fig. 4).

Cette largeur nous donne la bande passante en bruit du filtre.

Le bruit étant spécifié en puissance par unité de bande passante, il nous faut tirer un facteur de correction.

$$f_{\text{dB}} - 10 \log \frac{\text{Bande passante du système}}{\text{Bande passante du filtre d'analyse } (B_R)}$$

ex. : en vidéo,
 B du système = 6 MHz
 B_R = valeur déterminée par géométrie.

L'analyseur utilise un détecteur crête et un ampli logarithmique : ces deux caractéristiques entraînent une erreur sur la mesure qu'il faudra compenser en ajoutant 2,5 dB à la valeur de bruit lue (1,05 dB en représentation linéaire).

D'autre part, le filtrage après détection devra présenter une bande passante inférieure ou égale à $\frac{1}{100}$ de la bande passante d'analyse.

Les photos des figures 5 et 6 montrent l'action du filtrage.

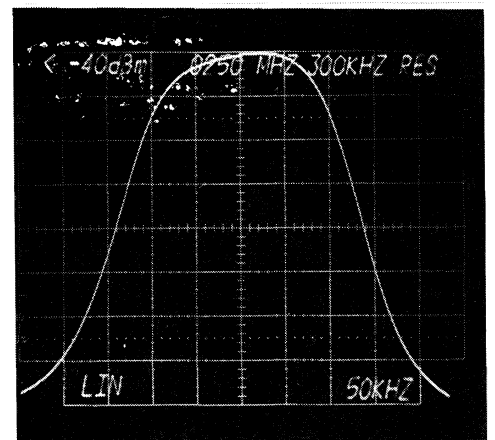


Fig. 3. - Représentation en mode linéaire du filtre 300 kHz de l'analyseur de spectre 7L14.

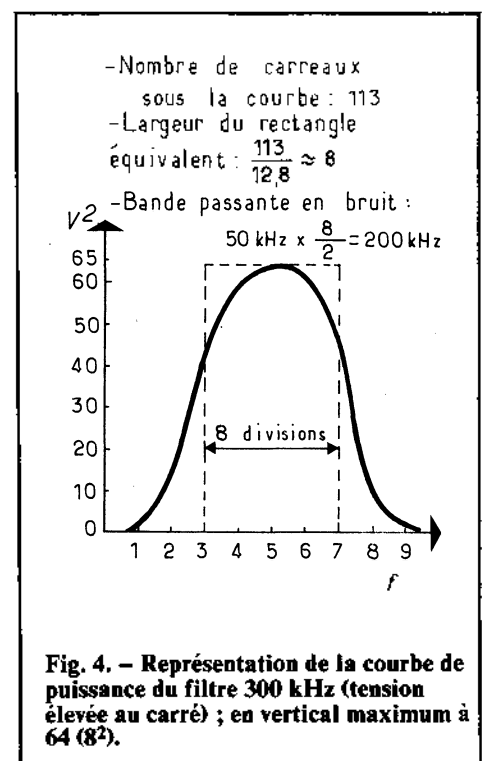


Fig. 4. - Représentation de la courbe de puissance du filtre 300 kHz (tension élevée au carré) ; en vertical maximum à 64 (8²).

Exemple numérique sur signal TV

● Mesure de la puissance de bruit à 250 MHz en dBm/Hz.

● Niveau du signal :
-66 dB_{mV} = -114,75 dBm.

● Niveau corrigé : -114,75 dBm + 2,6 = -112,75 dBm.

● Bande passante de bruit :
200 kHz.

● Correction pour ramener la lecture à 1 Hz.

$$10 \log \frac{200 \cdot 10^3}{1} = + 53 \text{ dB.}$$

● Niveau de bruit :

= -112,75 - 53.

= -165,75 dBm/Hz.

Un système idéal qui n'apporterait aucun bruit nous donnerait -174 dBm/Hz, ce qui nous permet de déduire le facteur de bruit du système :

$$-165,75 - (-174) = 8,25 \text{ dB.}$$

Répercussion sur la dynamique

En prenant l'exemple de l'analyseur de spectre Tektronix 7L5.

Compression 1 dB : -10 dBm.

Niveau garantissant 70 dB de réjection d'intermodulation : -30 dBm.

Plancher de bruit avec le filtre 10 Hz : -135 dBm.

La bande passante d'entrée de cet appareil est de 5 MHz. Si l'on applique un bruit blanc de valeur -10 dBm, quelle va être la valeur lue ?

Avec un filtre d'analyse de 1 kHz la perte relative est de :

$$10 \log \frac{5 \text{ MHz}}{1 \text{ kHz}} = 37 \text{ dB.}$$

C'est-à-dire qu'au lieu de lire -10 dBm le niveau de bruit lu sera de :

$$-10 \text{ dBm} - 37 \text{ dB} = 47 \text{ dBm/1 kHz.}$$

Sachant que le plancher de bruit de l'appareil pour le filtre d'analyse de 1 kHz est de -120 dBm, ceci nous laisse une plage de mesure de
120 - 47 = 73 dB.

C'est la *dynamique* utilisable de l'appareil dans ces conditions.

Mesure de bruit sur signaux TV

Matériel utilisé : analyseur de spectre 7L14 Tektronix avec le filtre 300 kHz (225 kHz en bruit).

Compression 1 dB : -10dBm.

Niveau garantissant une intermodulation à -70 dB : 30 dBm.

Plancher de bruit à 300 kHz : -90 dBm.

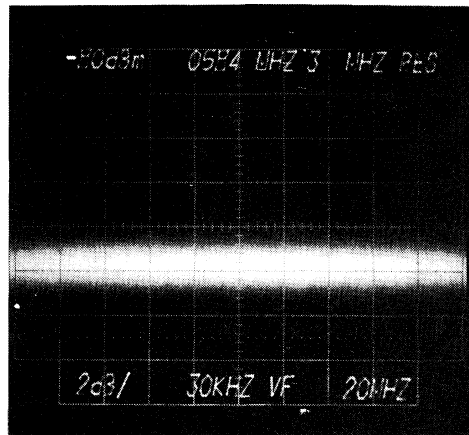


Fig. 5. - Niveau de bruit du 7L14 avec le filtre 3 MHz et un filtrage vidéo (après détection) de 30 kHz. Niveau moyen : -90 dBm.

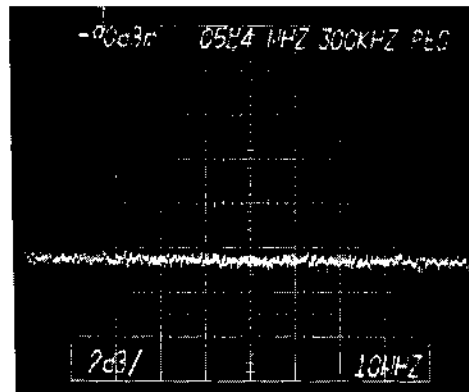


Fig. 6. - Niveau de bruit avec le filtre 300 kHz. Au lieu d'employer un filtrage vidéo, on utilise un avantage de la mémoire numérique qu'est le moyennage numérique. Avec une vitesse d'analyse de 0,5 s par division, le filtre numérique est de 50 Hz.

La bande passante en vidéo est de 6 MHz.

Le facteur de correction dû aux bandes passantes est de

$$10 \log \frac{6 \cdot 10^6}{225 \cdot 10^3} = 13 \text{ dB.}$$

Le bruit dans 6 MHz est donc de -90 dBm + 13 = -77 dBm.

En TV l'impédance utilisée est 75 Ω. La conversion 50 Ω → 75 Ω de dBm en dBmV

$$\text{dBmV} = \text{dBm} + 47.$$

Le niveau de bruit du système est donc de :

$$-77 \text{ dBm} + 47 = -30 \text{ dBmV.}$$

Les niveaux typiques rencontrés en TV sont de l'ordre de 0 dBmV (1 mV), ce qui nous laisse une dynamique de :

$$0 - (-30) = 30 \text{ dB.}$$

La seule possibilité pour améliorer cette caractéristique sera d'utiliser un préamplificateur.

Utilisation d'un préamplificateur (amplificateur CATV 7K11)

Le préamplificateur CATV 7K11 présente les caractéristiques suivantes :

entrée 75 Ω, sortie 50 Ω ;

facteur de bruit ≤ 5 dB et

sensibilité égale à -55 dBmV dans 300 kHz.

La figure 9 montre le principe de mise en œuvre de ce préamplificateur.

Le facteur de bruit de l'analyseur 7L14 est de

$$\begin{aligned} &-90 \text{ dBm Plancher de bruit} \\ &- (-119) = 29 \text{ dB Bruit théorique} \\ &\text{(spécification technique du 7L14)} \end{aligned}$$

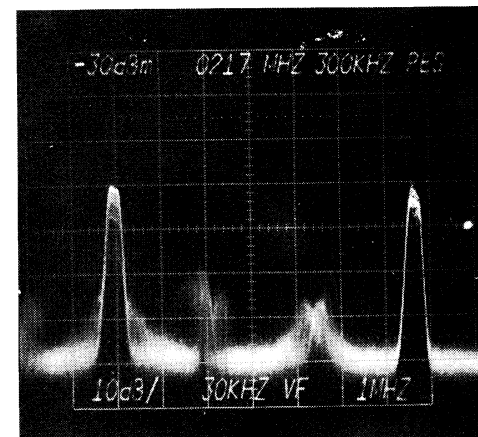


Fig. 7. - Signal télévision à l'entrée de l'analyseur de spectre. Le rapport signal à bruit est de 40 dB environ sur le signal de luminance.

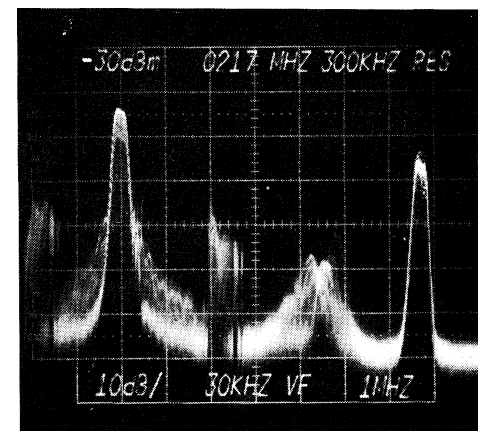


Fig. 8. - Même signal qu'en 7 mais avec préamplification, le rapport signal à bruit est de 50 dB soit un gain de 10 dB de dynamique de visualisation.

Temps Div	10 s	5 s	2 s	1 s	0,5 s	0,2 s	50 ms	20 ms	10 ms	5 ms	
- Moyennage numérique	2,5	5	12,5	25	50	125	250	500	1,25	2,5	5
- Largeur du filtre	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	kHz	kHz	kHz

Tableau 1 : Bande passante équivalente à un filtre vidéo en mode moyennage numérique.

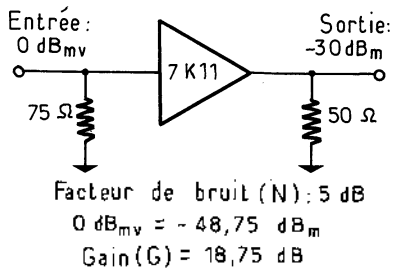


Fig. 9. - Préamplificateur télévision 7K11 Tektronix. Assure l'adaptation d'impédance 75 Ω → 50 Ω.

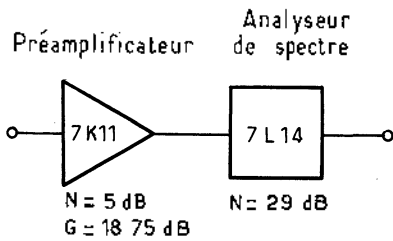


Fig. 10. - 7K11 devant un analyseur de spectre.

La figure 10 montre l'association d'un 7K11 et d'un 7L14.

Le facteur de bruit de l'ensemble est de

$$F_{TOT} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

Il est à noter que les valeurs portées dans l'équation précédente ne sont pas des décibels mais des nombres.

$$F_1 = 5 \text{ dB} = 3,16$$

$$F_2 = 29 \text{ dB} = 794$$

$$G_1 = 18,75 \text{ dB} = 75$$

$$F_{TOT} = 3,16 + \frac{794 - 1}{75} = 13,73$$

$$F_{TOT} = 11,37 \text{ dB}$$

soit une amélioration de $20 - 11,37 = 8,63 \text{ dB}$

Répercussion sur la dynamique

En prenant un analyseur de facteur de bruit 20 dB avec un filtre d'analyse 1 MHz, le plancher de bruit est de $-114 + 20 = -94 \text{ dBm}$, le niveau d'entrée optimum est de -30 dBm soit une dynamique de $-94 - (-30) = 64 \text{ dB}$. En plaçant à l'entrée un préampli de facteur de bruit 6 dB et de gain 20 dB.

$$F_{TOT} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} = 4,99 = 7 \text{ dB}$$

ce qui nous donne une sensibilité de $-114 \text{ dBm} + 7 = -107 \text{ dBm}$ soit par rapport aux -94 dBm un gain de 13 dB.

Par contre, comme le niveau optimum à l'entrée reste de -30 dBm , à l'entrée du préampli le niveau maximum sera de $-30 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} = -50 \text{ dBm}$. Soit une dynamique pour l'ensemble de

$$-50 - (-107) = 57 \text{ dB.}$$

Or avec l'analyseur seul cette dynamique était de 64 dB.

Nous avons donc une perte en dynamique d'intermodulation et de distorsion de

$$64 - 57 = 7 \text{ dB.}$$

Dans ce cas le préampli dégrade les caractéristiques de l'ensemble. Par contre, avec un signal faible de l'ordre de -50 dBm , la dynamique avec l'analyseur simple est de

$$-50 \text{ dBm} - (-94 \text{ dBm}) = 44 \text{ dB}$$

avec le préampli

$$-50 \text{ dBm} - (-107 \text{ dBm}) = 57 \text{ dB}$$

soit un gain de 11 dB

Mesures en bruit impulsionnel

Nous sommes entourés de bruits impulsionnels, certains indésirables comme les parasites d'allumage, d'autres utiles comme les impulsions des radars de navigation. Dans tous les cas la répartition de leur énergie dans le spectre radioélectrique est le paramètre important à mesurer.

Contrairement au bruit aléatoire en bruit impulsionnel, les composantes sont en relation de phase.

- Quand la bande passante du filtre d'analyse double la tension de bruit mesurée double. Les unités de mesure sont des tensions par unité de bande passante telles que $\text{dB}_{\mu\text{V}}/\text{MHz}$.

Répercussions sur les mesures

Il nous faudra mesurer la bande passante du filtre de résolution (méthode graphique) en sachant qu'une bande passante large améliore la sensibilité et mesurer la bande passante en impulsion du filtre d'analyse. Notons que le bruit impulsionnel limite la dynamique de l'analyseur. Pour effectuer cette mesure, il faut représenter dans la totalité de l'écran l'enveloppe du filtre en mode linéaire (voir fig. 13).

On mesure alors la surface sous la courbe pour tirer la largeur d'un rectangle qui aurait la même amplitude

et la même surface. Cette largeur nous donnera en prenant la valeur de la dispersion la bande passante du filtre en impulsion.

Sur la photo de la figure 13, le nombre de carrés sous la courbe est de 44, la largeur équivalente est donc $\frac{44}{8} = 5,5$.

- Bande passante $5,5 \times \text{disp} = 5,5 \times 50 \text{ kHz}$

La bande passante, égale au produit « largeur équivalente dispersion » est déduite ici :

$$5,5 \cdot 50 \text{ kHz} = 275 \text{ kHz.}$$

La bande passante à 6 dB étant de 280 kHz, l'erreur est de 1,8 %.

Du point de vue détection, l'analyseur est équipé d'une détection crête, ce qui convient parfaitement à nos mesures. Les filtres répondant en impulsion, il ne devra pas être fait usage de filtrage après détection pour ne pas intégrer les points.

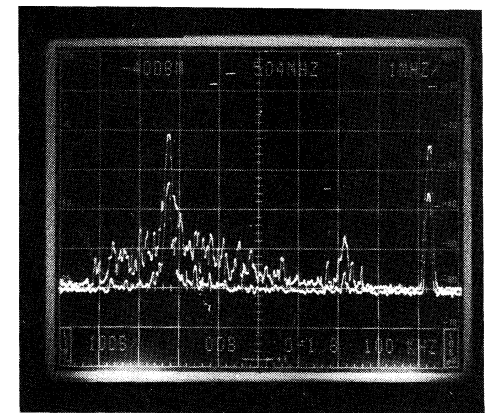


Fig. 11. - Double représentation. Trace inférieure A : signal télévision sans amplification. Trace supérieure B : même signal avec amplification. Les niveaux luminance et son ont monté de 12 dB, le bruit, lui, de 2 dB, soit une amélioration de 10 dB.

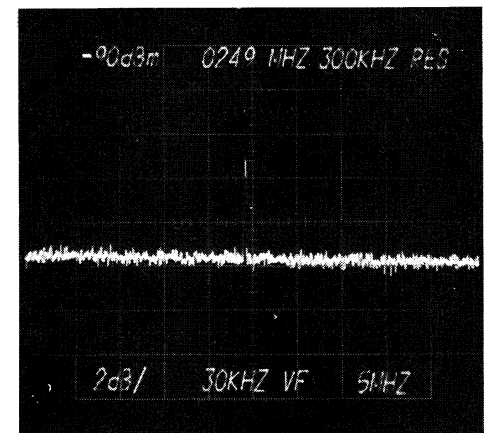


Fig. 12. - Facteur de bruit de l'analyseur 7L14 utilisé pour la rédaction de cet article. Le bruit théorique dans 200 kHz est de -121 dBm . Le niveau mesuré de $-99,7$. Soit un facteur de bruit de 21,3 dB.

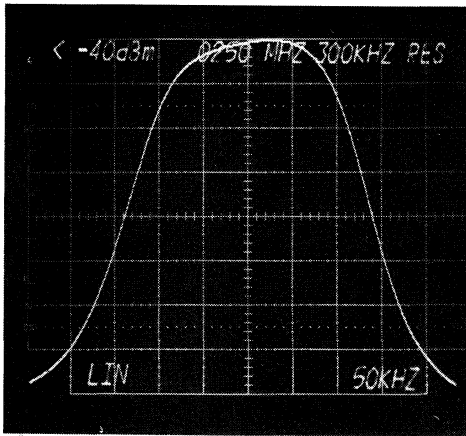


Fig. 13. - Représentation en mode linéaire du filtre 300 kHz. Evaluation de la surface comprise sous la courbe.

Les mesures doivent être converties en tension puisque les signaux sont en relation de phase entre eux et la mesure, pour plus de pratique, est ramenée dans une bande passante unitaire et dans ce cas la correction appliquée est :

$$20 \text{ Log}$$

$$\left(\frac{\text{Bande passante système}}{\text{Bande passante du filtre}} \right) \text{ en impulsion}$$

Exemple (fig. 14 et 15)

Signal rectangulaire dont le niveau à 22 MHz est de -37 dBm, soit -37 + 107 = 70 dBμV.

Pour une bande passante de 1 MHz la correction à apporter est de :

$$20 \text{ Log} \left(\frac{10^6}{275 \cdot 10^3} \right) = 11,2 \text{ dB}$$

Le niveau de bruit impulsionnel à 22 MHz dans une bande passante de 1 MHz est donc de :

$$70 \text{ dB}\mu\text{V} + 11,2 \text{ dB} = 81,2 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{MHZ}$$

Répercussions sur la dynamique en prenant l'exemple du 7L5

Compression 1 dB :

- 10 dBm (97 dBμV)

- 30 dBm (77 dBμV)

Niveau de bruit dans 30 MHz :

- 105 dBm (2 dBμV).

Dans le plus mauvais cas, lorsque le bruit couvre les 5 MHz de bande passante de l'entrée de l'analyseur la correction à apporter sera de

$$20 \text{ log} \left(\frac{5 \cdot 10^6}{30 \cdot 10^3} \right) = 44 \text{ dB.}$$

Le niveau maximum sera donc de

$$97 \text{ dB}\mu\text{V} - 44 \text{ dB} = 53 \text{ dB}\mu\text{V}$$

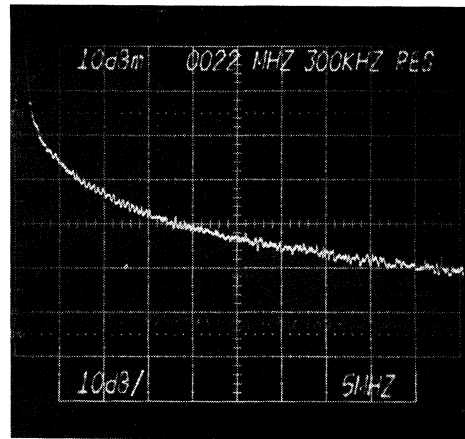


Fig. 15. - Le mode « MAX HOLD » maintient des maxima est très avantageux pour mémoriser des signaux à très faibles taux de répétition.

soit une dynamique de

$$53 \text{ dB}\mu\text{V} - 2 \text{ dB}\mu\text{V} = 51 \text{ dB.}$$

Pour des filtres plus étroits la situation est encore plus défavorable. En pratique, on considérera un signal comme impulsionnel lorsque le produit de la largeur de l'impulsion en fonction du temps t_0 par la fréquence de répétition égale 0,1

$$t_0 \cdot f = 0,1$$

dans ce cas l'équation de la forme

$$\frac{\sin x}{x} \text{ sera } \frac{\sin 0,1 \pi}{0,1 \pi} = 0,98$$

soit 2 % d'erreur.

Lorsque la largeur du filtre d'analyse croît d'un facteur 10, la tension lue croît d'un facteur 10 soit 20 dB en puissance.

Par contre, le bruit propre de l'analyseur qui est du type aléatoire croît de 10 dB pour le même accroissement de la bande passante, ce qui traduit par un gain de 10 dB sur la dynamique de mesure.

En résumé le produit $t_0 B \leq 0,1$ dans le cas de mesure en impulsion

t_0 = largeur des impulsions

B = bande passante du filtre d'analyse pour faire des mesures en bruit impulsionnel.

Conclusion

Cet exposé n'a pas la prétention de passer en revue tous les détails des mesures de bruit, mais d'en donner les caractéristiques principales. De plus les analyseurs de spectre peuvent être équipés de fonctions ou d'accessoires qui facilitent ces mesures telles que les mémoires numériques avec les possibilités de maintien de maxima, de moyennage numérique, ou de microprocesseurs qui permettent d'annuler les facteurs de correction, de traduire la

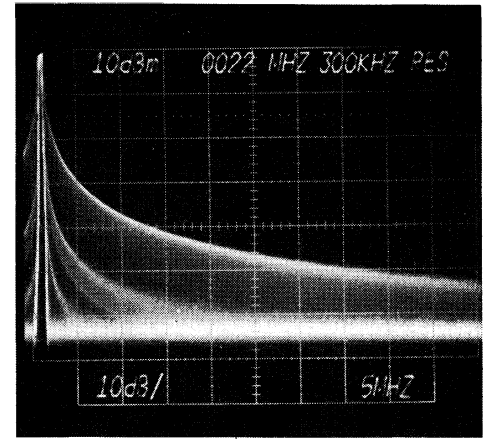


Fig. 14. - Bruit impulsionnel dû à un signal rectangulaire.

mesure directement dans l'unité désirée. L'analyseur de spectre ne surpasse pas les appareils habituels de mesure de bruit comme les récepteurs ou les bolomètres, mais permet une analyse très pratique et rapide puisque la mesure se fait sur une bande de fréquence et non pas sur une fréquence fixe. De plus, l'apparition d'analyseurs de spectre programmables tels que le 492 P Tektronix permettent de faire des mesures de manière automatique et bien reproductibles avec une bonne précision grâce au calculateur.

Y.P.

Bibliographie :

- « Noise measurements using the spectrum analyser » par Morris Engelson.
- Spectrum analyser : noise seminar - Tektronix.

Dans

Toute l'Electronique

En novembre :

- Les générateurs de fonctions
- Les applications du quartz en électronique

En décembre :

- Fiabilité et maintenance