4.5. Instabilité du faisceau.

B. Epsztein d'une part et J. Feinstein et G. S. Kino [4] d'autre part ont émis l'hypothèse de l'existence de deux trajectoires possibles pour le faisceau électronique dans les tubes M. L'instabilité du faisceau pourrait être une oscillation entre ces deux positions.

5. Conclusion.

Du point de vue pratique, la connaissance des caractéristiques d'O. P. permet à l'heure actuelle de diminuer leur importance lors du réglage du tube. Ceci se fait d'ailleurs parfois au détriment d'autres caractéristiques, la puissance notamment.

La mesure des O. P. est assez délicate du fait de la présence d'un courant modulé à la fréquence f, dans les circuits d'alimentation de ligne et de sole.

Du point de vue théorique nous savons maintenant que le spectre d'O. P. est dû à une instabilité du faisceau à la fréquence f. Cette instabilité se traduit par suite de la variation de I_t par une modulation de fréquence (pushing) et par une modulation d'amplitude. Il reste à déterminer la cause première du phénomène qui entraîne cette instabilité.

Références

1 O. Doehler, « The *M* Carcinotrons », *Crossed-Field Microwave Devices*, Academic Press.

2 M. C. Pease, Beam Launching in High Power Crossed-Field Tubes, *Crossed-Field Microwave Devices*, Academic Press.

3 A. Angot, Fonctions de Bessel, p. 413, *Compléments de Mathématiques*, Collection technique du C. N. E. T.

4 J. Feinstein and G. S. Kino, The Large Signal Behaviour of Crossed-Field Traveling Wave Devices, *Crossed-Field Microwave Devices*, Academic Press.

COMPARAISON EXPÉRIMENTALE ENTRE DES SOURCES DE BRUIT A CHAMPS CROISÉS ET DES GÉNÉRATEURS CLASSIQUES

J. Arnaud et R. Gerber

C. S. F., Centre de Physique Electronique et Corpusculaire, Orsay, France.

Cet exposé a pour but de préciser les caractéristiques du bruit anormal des canons en champs croisés et l'étude de l'amplification de ce bruit en hyperfréquence.

Les canons électroniques immergés dans un champ magnétique intense parallèle à la surface de la cathode présentent un niveau de bruit anormalement élevé ; les fluctuations du courant total peuvent être observées à l'aide d'un oscilloscope.

Avant de présenter les résultats expérimentaux rappelons que la probabilité $F(x)$ pour que le signal soit supérieur à x ($F(x)$ = 1-fonction de répartition) s'écrit pour un signal gaussien

$$F(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-x^2/2\sigma^2)\,dx$$

$$= \tfrac{1}{2}\left[1 - \Theta(x/\sqrt{2}\sigma)\right],$$

σ étant la valeur quadratique moyenne, et Θ la fonction erreur.

Lorsque le signal a une bande relative faible il est quasisinusoïdal et l'amplitude de l'enveloppe a pour fonction $F(A)$

$$F(A) = \int_A^\infty \frac{u}{\sigma^2} \exp(-u^2/2\sigma^2)\,du = \exp(-A^2/2\sigma^2).$$

Cette fonction est représentée par une parabole en échelle logarithmique. Si le signal est détecté par un détecteur quadratique, la fonction $F(P)$ de la puissance s'écrit :

$$F(P) = \int_P^\infty \frac{1}{2\sigma^2} \exp(-y/2\sigma^2)\,dy = \exp(-P/2\sigma^2).$$

Cette fonction est représentée par une droite en échelle logarithmique. Un calcul de S. O. Rice [1] permet d'obtenir la loi de distribution des maxima de l'enveloppe et en particulier la valeur moyenne des maxima ; elle a pour valeur en amplitude :

$$\overline{A}_{max}/\sqrt{\overline{A^2}} = 1{,}21$$

1. — Fonction de répartition.

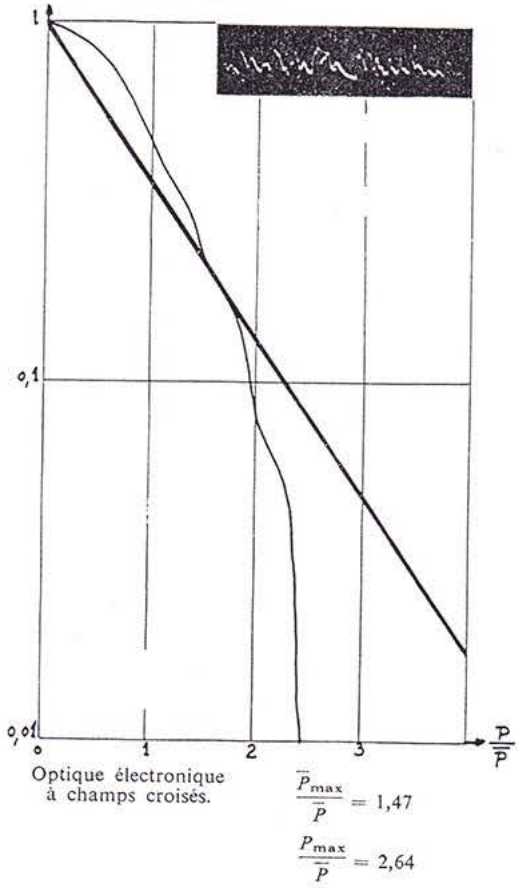


Fig. 1. — Tube coaxial à champs croisés : photo et répartition du bruit au-dessus d'un niveau donné.

en puissance :

$$\overline{P}_{max}/\overline{P} = 1{,}63 .$$

L'oscillogramme de la Figure 1 est relatif au bruit anormal d'une optique coaxiale qui est un système à champs électrique et magnétique croisés de révolution ; le courant de bruit qui est quasi sinusoïdal a été redressé par un détecteur quadratique. On constate que la fonction de répartition est assez différente d'une répartition gaussienne (en trait plein sur la Figure 1) une saturation se produisant à 2,6 fois la puissance moyenne. Ce résultat est en accord avec l'hypothèse [2] que le bruit anormal a pour origine une oscillation de la charge d'espace, l'amplitude d'une telle oscillation étant limitée par l'apparition de non linéarités.

La Figure 2 est la reproduction d'oscillogrammes de la puissance $P(t)$ d'un générateur de bruit à champs croisés constitué d'un canon à bruit anormal suivi d'une région d'amplification en champs croisés. Ces oscillogrammes permettent de mieux comprendre le mécanisme d'amplification du bruit ; en (A) le rendement du tube est seulement de 10 % et le faisceau n'est pas saturé de sorte que le signal de bruit présente des pointes importantes ; en B et D le rendement est de 30 % et on voit clairement apparaître un effet de saturation du signal ; le rendement atteint alors pendant de courts instants 70 % mais ne peut pas excéder cette valeur. Dans le cas de la figure C on constate un effet de saturation bien que le rendement soit faible (5 %) ; dans ce cas, la faible valeur du rendement est due aux fortes pertes d'insertion de la ligne à retard (10 dB).

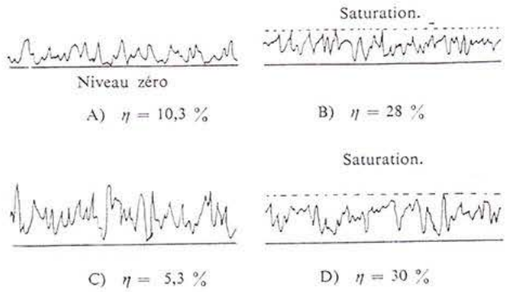


FIG. 2. — Rendement d'un générateur de bruit : effet de saturation

1 — Fonction de réparation.

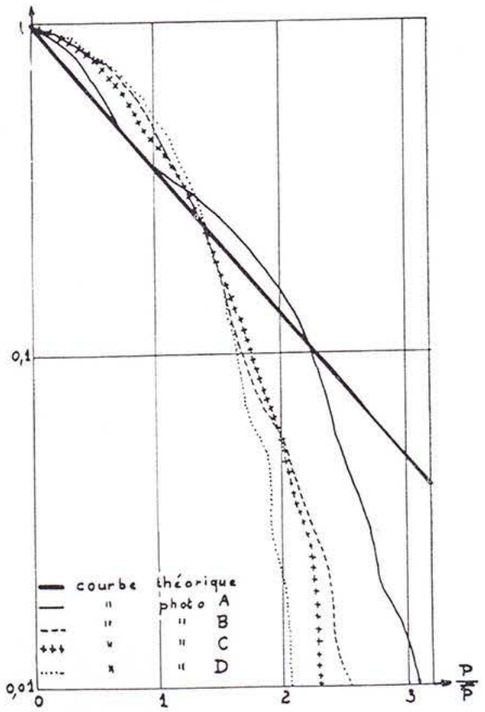
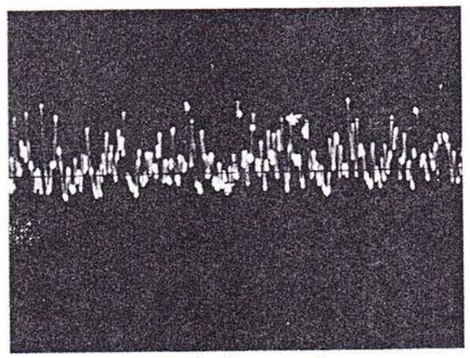
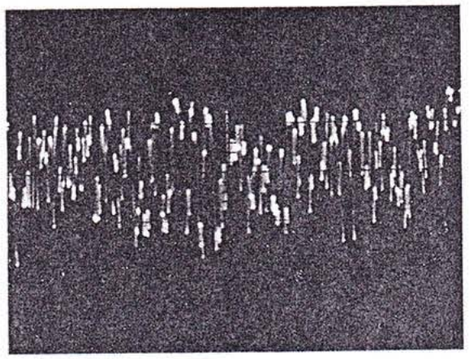


FIG. 3. — Fonction de répartition du bruit de 2 au-dessus d'un certain niveau.

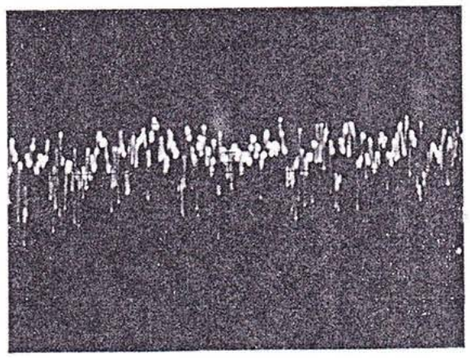
Fréquence centrale : 30 MHz
Bande passante : 4 MHz



A : Ampli non saturé



B : Ampli à demi saturé



C : Ampli saturé

FIG. 4. — Bruit d'un amplificateur à transistors ; effet de la saturation sur le signal. 3 photos.

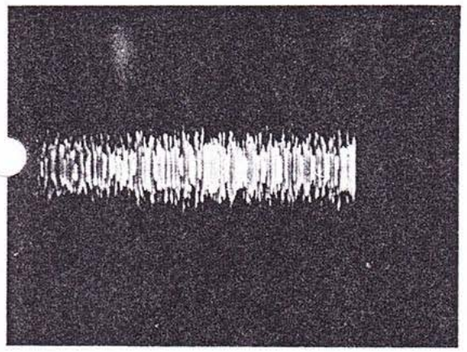
La Figure 3 donne les relevés numériques correspondant à ces oscillogrammes.

Sur la Figure 4 le même effet de saturation est observé sur un amplificateur à transistors amplifiant autour de 30 Mc/s ; En A le signal a une répartition gaussienne : en C la saturation est très marquée.

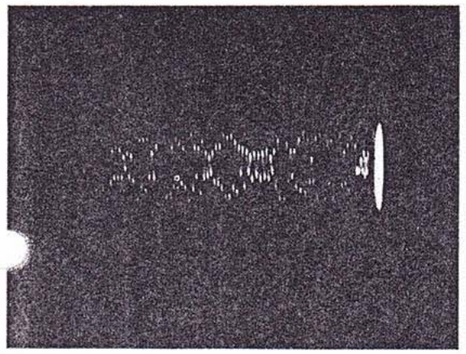
La Figure 5 correspond à l'observation directe sur un oscilloscope à large bande (0-1000 MHz) du signal de bruit délivré par le tube à champs croisés, pour des vitesses de balayage de 100, 20 et 10 nanosecondes.

Le relevé de la fonction de répartition correspondant à l'amplitude de ce signal est donné sur la Figure 6 à gauche.

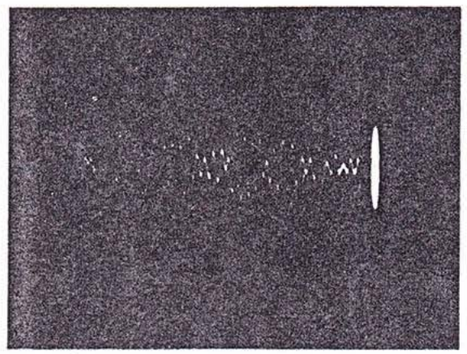
Signal HF
η = 20 %



A : 100 ns/cm



B : 20 ns/cm



C : 10 ns/cm

FIG. 5. — Générateur de bruit vu à travers un oscilloscope à large bande (0 — 1.000 MHz) 3 vitesses de balayage.

Pour comparer ce résultat avec la mesure utilisant un détecteur quadratique, le signal de bruit a été élevé au carré et la fonction de répartition en puissance est présentée à droite de la Figure 6 ; cette courbe est voisine de la courbe B de la Figure 3, et la réponse du détecteur est par conséquent satisfaisante.

Une caractéristique importante d'un signal de bruit pour certaines applications est la valeur moyenne des puissances de pointes ; la valeur théorique pour un signal gaussien est, comme on l'a indiqué, égale à 1,63 fois la puissance moyenne. La valeur expérimentale obtenue est plus faible : 1,4 pour le signal de la Figure 5.

Mais la même mesure faite sur un signal gaussien obtenu avec un générateur classique et un amplificateur linéaire conduit également à la valeur 1,45 (Figure 7). Cet écart paraît être dû au fait que la signal utilisé n'a pas une bande relative assez étroite pour obtenir une bonne définition des pointes. Sur cette Figure 7 la courbe pointillée est obtenue avec un tube à champs croisés dont la répartition est très voisine de celle d'un signal gaussien.

Les générateurs de bruit à champs croisés présentent un effet parasite qui est lié à la grande sensibilité du canon à un signal H. F. extérieur [2] ; la sortie de la ligne à retard rayonne une partie du champ H. F. qui est susceptible de moduler le faisceau dans le canon ; cette réaction entraîne soit l'oscillation cohérente du tube, soit des fluctuations périodiques du spectre correspondant à la longueur de la ligne à retard (effet de longue ligne). La Figure 8 montre un tel spectre fortement ondulé. Cette ondulation peut être également mise en évidence par la mesure de la fonction d'auto-corrélation ; la fonction d'auto-corrélation étant la transformée de Fourier de la densité spectrale, une fluctuation presque périodique du spectre avec une période ΔF entraîne un maximum de la fonction d'auto-corrélation au voisinage du temps $t = \Delta F^{-1}$.

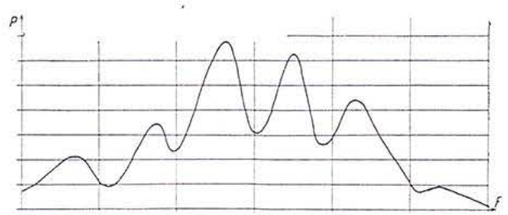


FIG. 8. — Spectre en puissance d'un générateur de bruit.

La fonction d'auto-corrélation du tube à champs croisés a été mesurée directement en hyperfréquence en utilisant un câble de longueur variable (Figures 9 et 10).

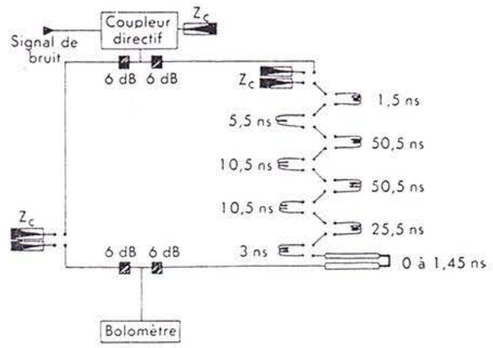
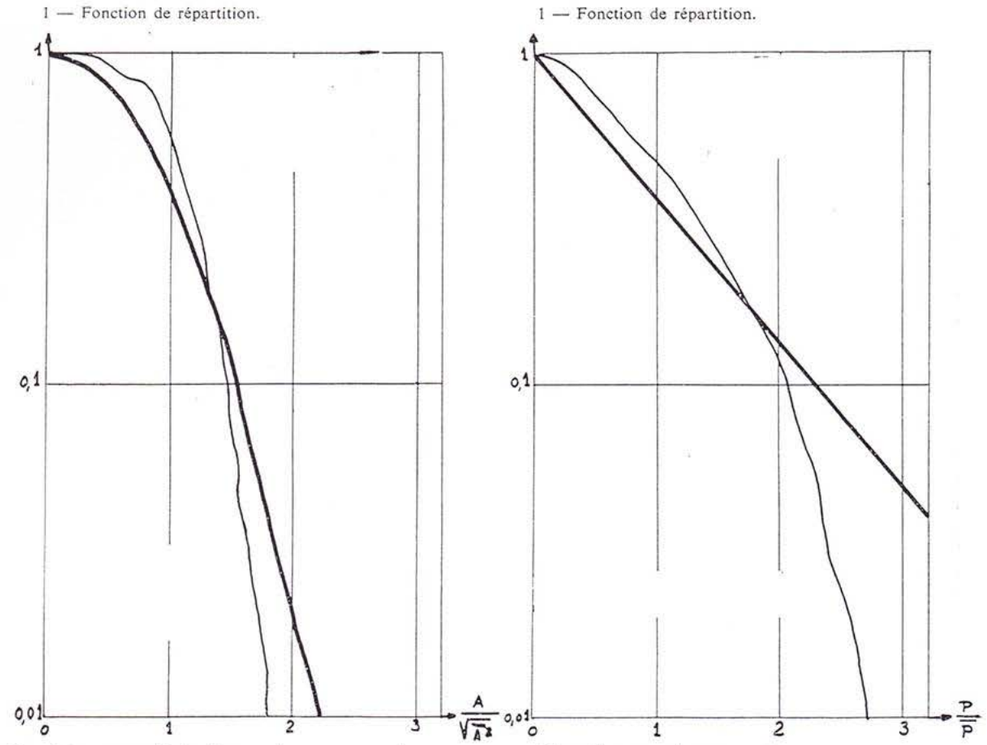


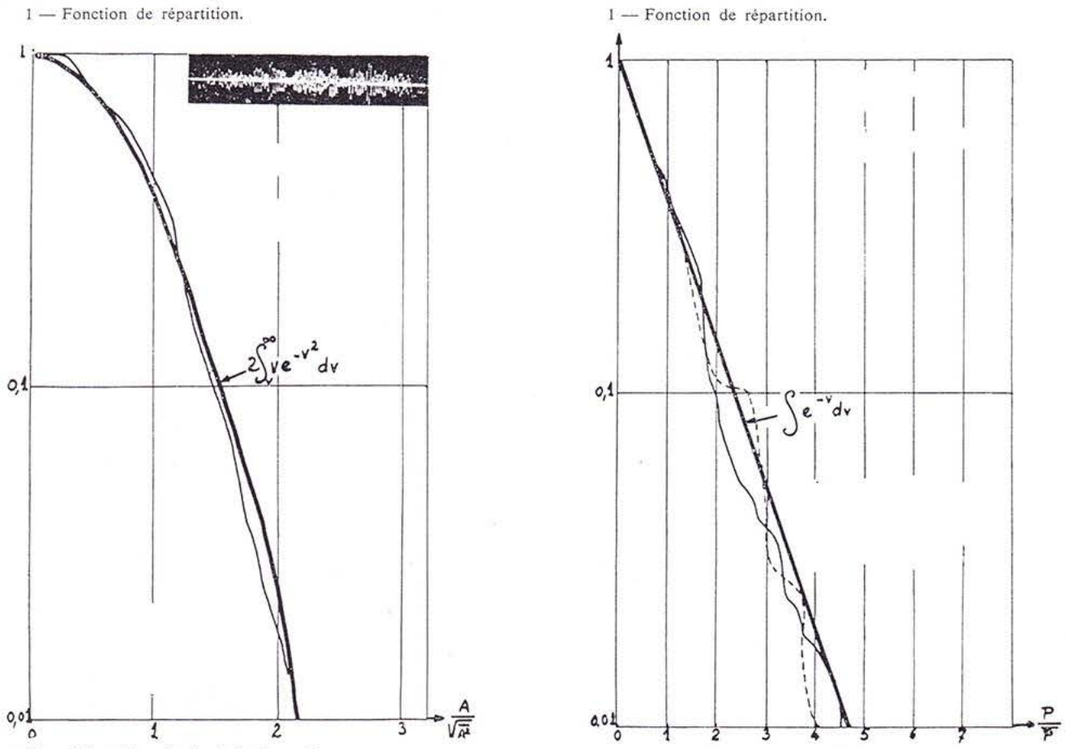
FIG. 9. — Mesure du coefficient d'auto-corrélation : schéma de montage.



Répartition en amplitude d'un générateur de bruit dans un oscilloscope 1.000 MHz $\frac{A_{max}}{\sqrt{\overline{A^2}}} = 1{,}18$; $\frac{A_{max}}{\sqrt{\overline{A^2}}} = 1{,}81$

Répartition en puissance du même générateur de bruit. $\frac{P_{max}}{\overline{P}} = 1{,}43$; $\frac{P_{max}}{\overline{P}} = 3{,}26$

FIG. 6. — Fonction de répartition de 5 (photo B) en amplitude et du carré de l'amplitude au-dessus d'un niveau donné.



Répartition d'amplitude de bruit d'une résistance à l'entrée d'un amplificateur (à faible bruit). $\frac{\overline{A}}{\sqrt{\overline{A^2}}} = 1{,}05$; $\frac{A_{max}}{\sqrt{\overline{A^2}}} = 2{,}14$

Même répartition mais le signal passe à travers un système quadratique idéal. $\frac{\overline{P}_{max}}{\overline{P}} = 1{,}45$; $\frac{P_{max}}{\overline{P}} = 4{,}63$

FIG. 7. — Bruit en amplitude d'une résistance à travers un amplificateur 70 MHz ; répartition de l'amplitude et du carré de l'amplitude au-desus d'un niveau donné.

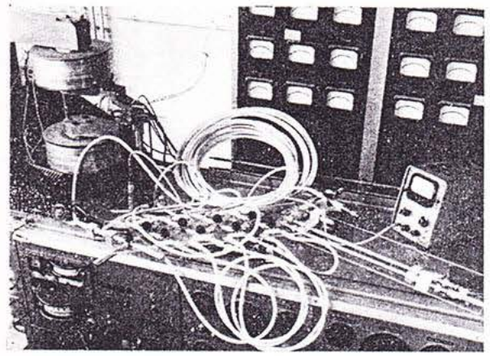


FIG. 10. — Photo du montage de 9.

Le résultat est présenté sur la Figure 11. La Figure du haut représente le coefficient d'auto-corrélation théorique supposant que le spectre est rectangulaire ; l'enveloppe alors de la forme sin $2\pi ft(2\pi ft)^{-1}$ si f est la largeur spectre. La Figure centrale est la transformée de Fourier de la densité spectrale réelle de la Figure 8 ; on remarque un accroissement de l'amplitude du coefficient d'auto-corrélation au voisinage de $t = 43$ nanosec $\simeq \Delta F^{-1}$ par rapport à la courbe précédente. La courbe expérimentale en bas de la Figure 11 présente également cet accroissement autour de $t = 43$ ns. La mesure a été poursuivie jusqu'à $t = 100$ ns sans qu'apparaissent d'autres singularités.

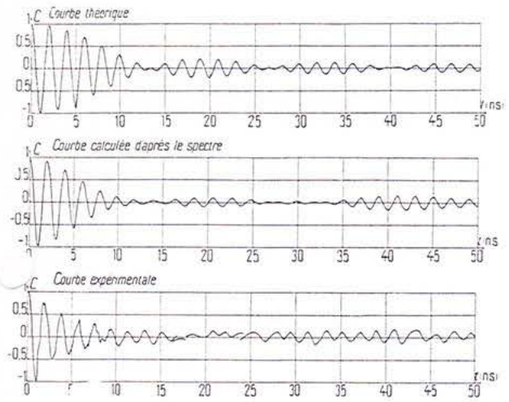


FIG. 11. — 3 courbes du coefficient d'auto-corrélation de 8.

A titre de comparaison, l'effet d'une réaction sur le bruit d'un amplificateur classique a été étudié. La Figure 12 montre les spectres de bruit pour différents taux de réaction ; en bas il n'y a pas de réaction ; au milieu, la réaction avec un temps de retard de 116 ms (égal à 3,5 fois l'inverse de la largeur de bande de l'amplificateur), entraîne des variations périodiques du spectre. La Figure supérieure montre que le taux de réaction entraîne l'apparition de trois fréquences d'oscillation cohérente.

On peut aisément calculer la densité spectrale $P(\omega)$, d'un amplificateur avec une réaction retardée d'un temps t. Si l'amplificateur a une réponse en puissance $P_0(\omega)$ on aura :

$$P(\omega) = \frac{P_0(\omega)}{1 + m^2 + 2\,m \cos \omega t},$$

m étant le taux de réaction.

Il faut remarquer que $P(\omega)$ présente toujours des variations rapides en fonction de ω, si élevée que soit la valeur de t ; la valeur moyenne de $P(\omega)$ intégrée sur l'ensemble du spectre est conforme au résultat de Lezin [3].

Dans le cas des tubes à champs croisés il est possible de supprimer presque complètement le champ H.F. dans le canon par un blindage. Dans ce cas, les ondulations de la densité spectrale n'excèdent pas $\pm$ 1 dB ; elles sont dues seulement aux défauts d'adaptation.

Il existe cependant des phénomènes particuliers aux tubes à champs croisés générateurs de bruit. On constate en effet qu'une réaction, même très forte, obtenue par exemple en créant des réflexions très élevées aux extrémités de la ligne à retard n'entraîne pas l'oscillation cohérente du tube. Il semble que le niveau du bruit dans le faisceau soit alors assez élevé, même à l'entrée de l'espace d'interaction, pour dominer le signal cohérent qui pourrait apparaître. Ce phénomène n'apparaît pas dans les amplificateurs classiques qui ont un bruit propre très faible.

Dans les tubes à champs croisés le faisceau est modulé par le bruit anormal à l'entrée de l'espace d'interaction dans une bande de plus d'un octave et le niveau est tel qu'il y a des effets non linéaires marqués. Cependant l'interaction avec le circuit à retard se fait dans une bande réduite ($\Delta f/f \simeq 10$ % dans les tubes expérimentés) ; le taux de modulation du faisceau dans cette bande de fréquence, étant réduit à quelques pour cent, un gain de 10 à 20 dB est nécessaire pour obtenir un rendement maximum dans la bande de synchronisme.

Une expérience directe confirme ces résultats : si l'on injecte un signal cohérent à l'entrée de la ligne à retard on n'observe aucune interaction avec le faisceau, c'est-à-dire aucune amplification du signal cohérent. Ces résultats concernent des tubes dont les paramètres ont été étudiés pour obtenir un niveau de bruit optimum ; dans d'autres cas (avec des champs magnétiques de fonctionnement réduits en particulier), il est possible d'obtenir une synchronisation du bruit par le signal cohérent, si le niveau du signal est suffisamment fort.

En conclusion on peut dire que le bruit anormal des canons en champs croisés présente par lui-même un effet de saturation ; s'il est amplifié dans un système à champs croisés ou dans un TPO [4] une nouvelle saturation apparaît qui est liée au rendement moyen. Des fluctuations importantes du spectre sont observées si le canon n'est pas blindé ; ces fluctuations entraînent une perturbation mesurable du coefficient d'auto-corrélation. Si au contraire le champ H.F. ne pénètre pas dans le canon, un tel tube ne présente pas d'oscillation cohérente en présence de fortes réflexions.

Références

1 S. O. RICE, « Mathematical analysis of random noise ». Selected papers on noise and stochastic processes, Dover Editor.

2 J. ARNAUD, « Bruit anormal dans les canons électroniques et magnétiques croisés ». *Annales de radioélectricité*, tome XIX, n° 75, janvier 1964.

3 Yu. S. LEZIN, « Noise shape in circuits with delayed feedback ». *Radiotecknica i elecktronica*. Vol. 6-2, p. 1.

4 M. DESBRUÈRES, « Tube de bruit TB 1 000 (TPO à canon à injection magnetron). Rapport interne CSF n° 702-4953, 9 avril 1963.