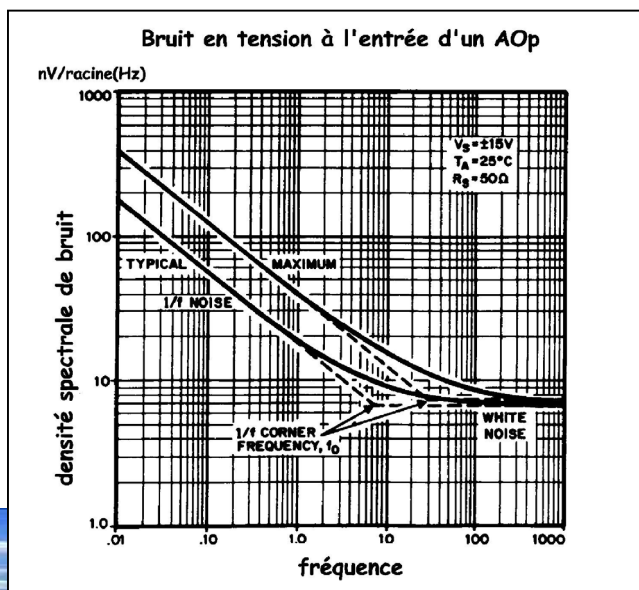




Le bruit dans les systèmes électroniques



jean-philippe muller

version juillet 2002

Sommaire

- 1- Introduction à la notion de bruit
- 2- Valeurs moyenne et efficace
- 3- Loi de distribution en amplitude
- 4- Spectre d'un bruit
- 5- Bruits blanc et coloré
- 6- Le bruit de grenaille
- 7- Le bruit thermique
- 8- Modélisation d'un dipôle bruyant
- 9- Température équivalente de bruit
- 10- Bruit des composants
- 11- Schéma équivalent d'un quadripôle bruyant
- 12- Bruit dans une chaîne de traitement
- 13- Filtrage d'un bruit
- 14- Densité spectrale de bruit
- 15- Bruit dans les composants actifs
- 16- La mesure du bruit
- 17- Méthode oscilloscopique tangentielle
- 18- Mesure du bruit à l'analyseur de spectre
- 19- Mesure de la densité spectrale
- 20- Mesure du rapport signal/bruit
- 21- Montages de mesure du bruit global



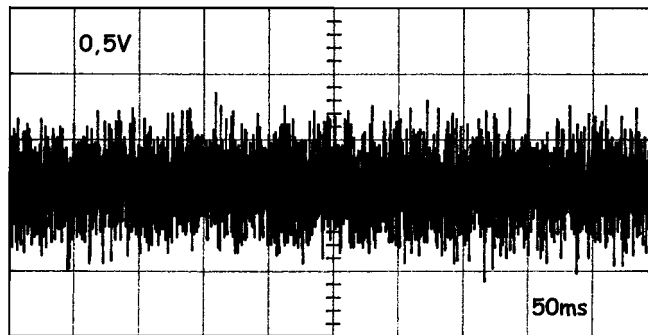
1- Introduction à la notion de bruit

Un signal est toujours affecté de petites fluctuations plus ou moins importantes . Ces fluctuations, dont les origines peuvent être diverses, sont appelées **bruit électrique**, **bruit de fond**, ou tout simplement bruit . On peut citer comme exemples :

- bruit de « friture » dans un récepteur radio entre deux stations
- bruit de souffle à la sortie d'un amplificateur

Un signal n'est jamais sans bruit . Simplement il peut être affecté d'un bruit plus ou moins important . Si celui-ci est très faible par rapport au signal, il devient invisible à l'oscilloscope .

Figure 1.
Tension fournie
par une source
de bruit

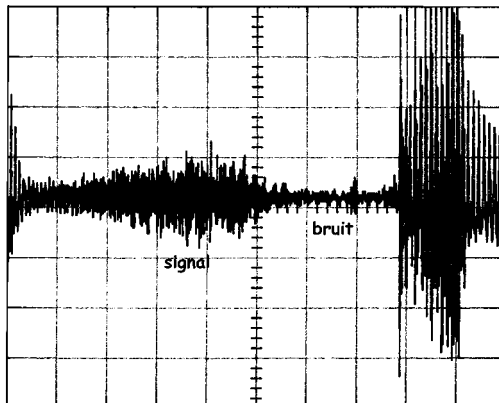


Le bruit qui affecte le signal en sortie d'une chaîne de traitement a deux causes bien distinctes :

⇒ **une cause extérieure** à la chaîne : c'est le bruit qui affecte déjà le signal à l'entrée de la chaîne et qui est amplifié et filtré avec le signal

- l'antenne du récepteur capte le signal de l'émetteur, mais aussi des parasites industriels et le bruit de fond cosmique de tous les astres qui rayonnent des ondes électromagnétiques.
- la tête de lecture du tourne-disque qui capte la musique inscrite dans le sillon mais aussi les bruits de surface, les vibrations de la platine et les décharges électrostatiques.

Figure 2.
Bruit en sortie
d'un récepteur
FM



Pour ce type de bruit, une conception soignée du produit (mécanique, électronique, blindages, filtrages, etc ...) nous donne un bruit minimal en sortie.

⇒ **une cause intérieure** : l'agitation thermique des électrons provoque des fluctuations aléatoires de la tension en tout point d'un circuit. C'est le bruit thermique qui existe toujours. On peut le diminuer en choisissant des composants à faible bruit mais on n'arrivera jamais à le supprimer.

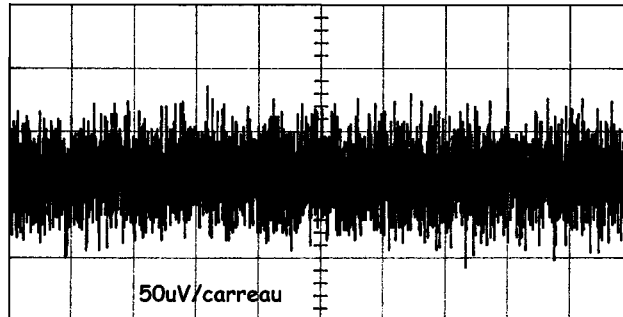
Outre ce bruit thermique, il existe d'autres catégories de bruits, toujours associés à la nature discontinue des porteurs de charges.



2- Valeurs moyenne et efficace d'un bruit

Nous avons vu que le bruit thermique est dû à l'agitation des électrons. Si nous regardons, avec un oscilloscope très sensible et de grande bande passante la tension $b(t)$ aux bornes d'une résistance R , nous voyons ceci :

Figure 3.
Bruit thermique
produit par
l'agitation
thermique des
électrons.



Les fluctuations étant aléatoires, il est clair qu'en moyenne, $b(t)$ est aussi souvent positive que négative. Nous en déduisons un premier résultat important :

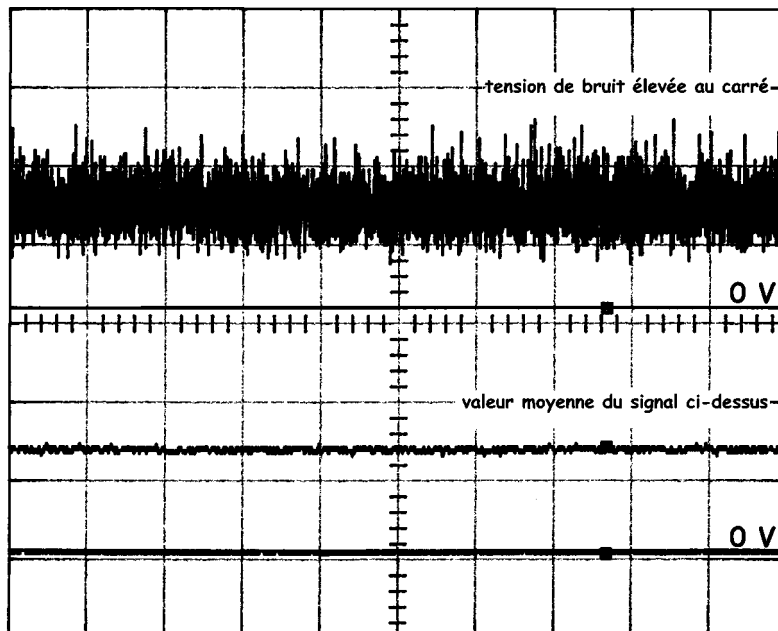
La valeur moyenne d'une tension de bruit est nulle $\overline{b(t)} = 0$

Par contre, si nous élevons cette tension au carré avant de prendre la valeur moyenne, le résultat ne sera plus nul. Nous en déduisons que :

La valeur efficace d'une tension de bruit n'est pas nulle $B_{\text{eff}} = \sqrt{\overline{b(t)^2}} \neq 0$

Une tension de bruit sera donc caractérisée par sa valeur efficace.

Figure 4.
Valeur efficace
d'une tension
de bruit.



C'est de cette façon que fonctionne le voltmètre RMS et donc qu'on pourra mesurer une tension de bruit.

Il faut cependant remarquer que les tensions de bruit sont en règle générale d'amplitude très faible et les voltmètres construits pour mesurer le bruit doivent être conçus pour avoir un bruit propre très faible.



3- Loi de distribution en amplitude

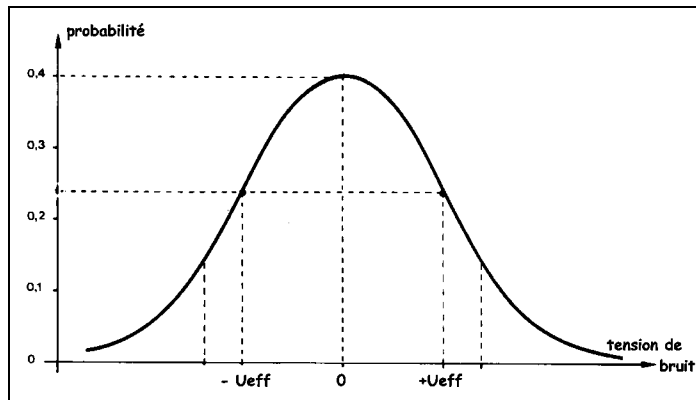
La tension de bruit $u(t)$ a une allure désordonnée. Il est donc impossible de prévoir la valeur qu'aura $u(t)$ à un instant t donné.

Par contre, on peut évaluer la probabilité de voir la tension $b(t)$ comprise dans une certaine fourchette autour d'une valeur fixée U_0 .

Si nous regardons la courbe représentant $b(t)$ nous constatons que cette probabilité décroît si U_0 augmente. Cela veut simplement dire que la tension $b(t)$ a souvent une valeur nulle ou très faible, mais beaucoup plus rarement une valeur élevée.

Pour la grande majorité des bruits, la courbe de probabilité appelée aussi courbe de répartition est une courbe en cloche (Gaussienne) et a l'allure suivante :

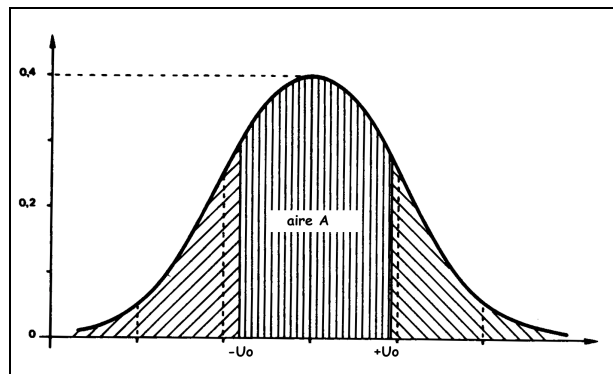
Figure 5.
Répartition des
amplitudes
d'une tension
de bruit



Nous pouvons faire plusieurs remarques concernant cette courbe :

- il y a 40 chances sur 100 pour que $b(t) = 0$ à un instant t
- la valeur efficace U_{eff} correspond à l'abscisse du point d'inflexion et correspond à l'écart-type σ
- la probabilité que $b(t)$ soit dans la tranche $-U_0, +U_0$ est proportionnelle à l'aire sous la courbe et comprise entre ces deux limites.

Figure 6.
Probabilité que
l'amplitude soit
dans la bande
 $-U_0/+U_0$



- si $U_0 = \infty$ l'aire sous la courbe vaut 1 et la probabilité est de 100 % (évident !)
- si $U_0 = U_{eff}$ la probabilité est 68 %
- si $U_0 = 2U_{eff}$ la probabilité est de 95 %
- si $U_0 = 3U_{eff}$ la probabilité est d'environ 99 %

Cette dernière remarque nous permet de dire que la tension de bruit ne dépasse (presque !) jamais la valeur $+3U_{eff}$ et on utilise souvent dans la pratique la tension de bruit crête-crête définie par :

$$B_{cc} = 6 B_{eff}$$

Exemple : un signal continu de 30 mV et affecté de 2 mV_{eff} de bruit fluctuera entre les valeurs $30 - 3U_{eff}$ et $30 + 3U_{eff}$ soit 24 mV et 36 mV avec une probabilité inférieure à 1 % de dépasser ces valeurs.

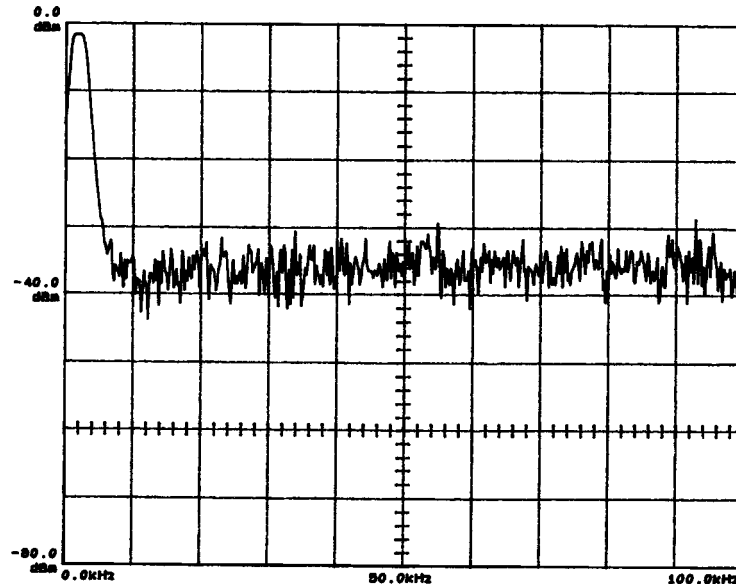


4- Spectre d'un bruit

Le caractère aléatoire du bruit explique que les composantes d'un bruit thermique peuvent avoir toutes les valeurs du continu jusqu'à des fréquences très élevées.

Le spectre d'un tel bruit est par conséquent constant et continu sur toute la gamme des fréquences et a l'allure suivante :

Figure 7.
Spectre
uniforme
caractéristique
d'un bruit
blanc.

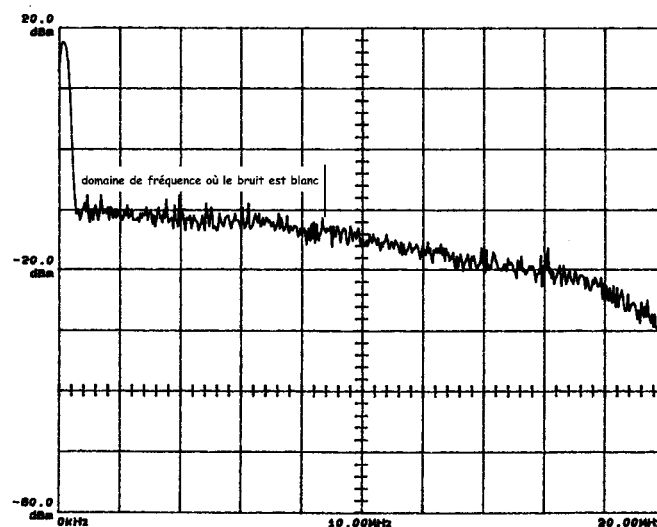


Un tel bruit est appelé **bruit blanc** par analogie avec la lumière blanche qui est aussi un mélange de toutes les fréquences.

Remarque : cette définition du bruit blanc est un peu théorique. En effet, les fréquences très élevées sont forcément filtrées par les capacités parasites réparties dans le montage et dans la pratique le spectre d'un bruit thermique est toujours borné .

On parlera donc de bruit blanc chaque fois que le spectre est constant dans une large gamme de fréquences .

Figure 8.
Spectre d'un
bruit blanc
dans la bande
0 - 8 MHz

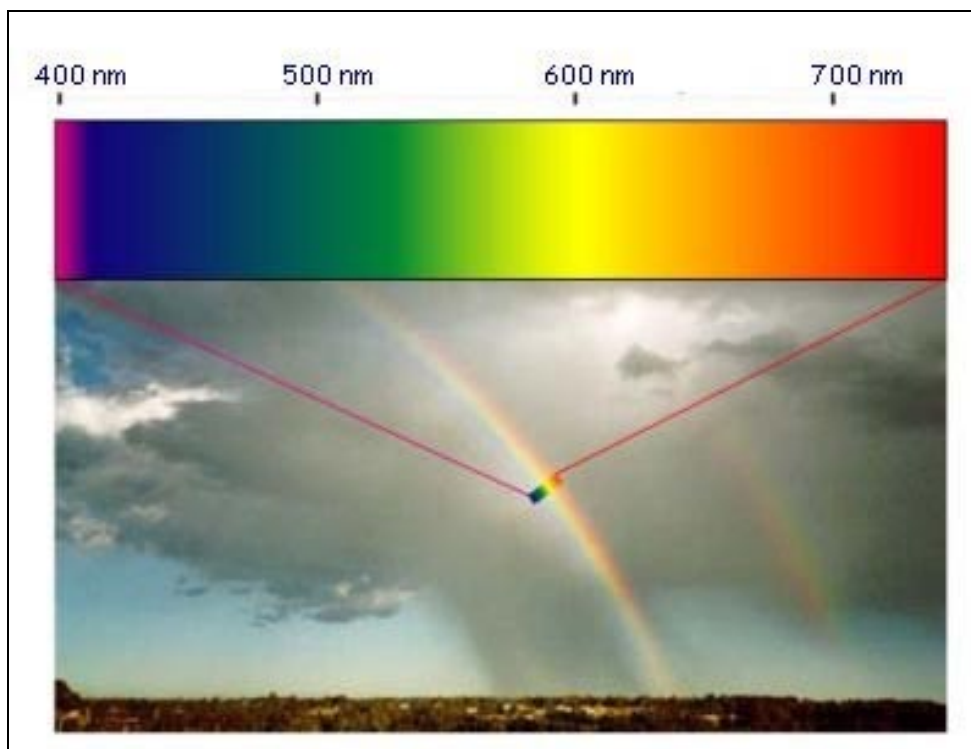


Par exemple, lorsqu'on travaille en audiofréquence, un bruit ayant un spectre constant dans la gamme 10Hz-100kHz sera qualifié de blanc.



5- Bruit blanc et bruit coloré

La lumière blanche est composée de radiations de toutes longueur d'onde entre 400 et 800 nm

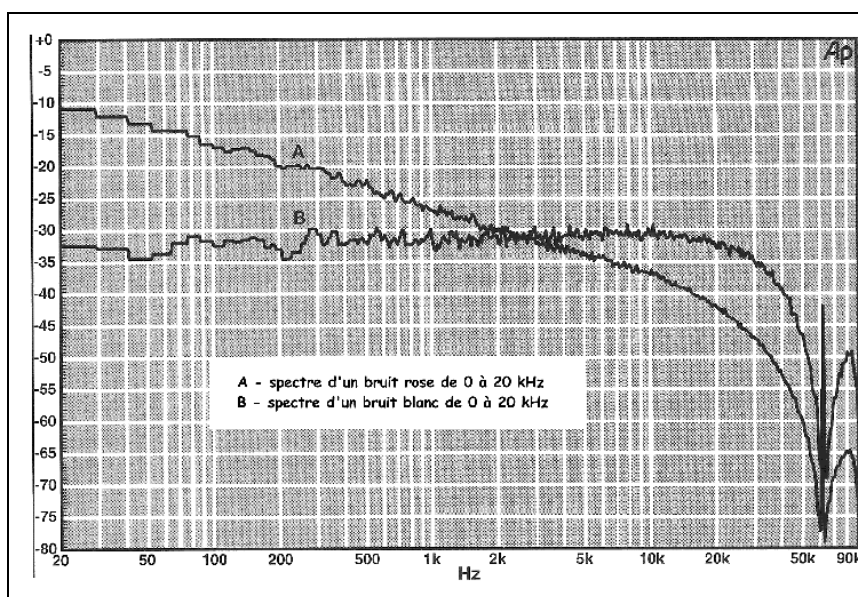


Lorsque la lumière contient davantage de radiations d'une certaine longueur d'onde, elle est colorée : elle devient rouge si elle contient de grandes longueurs d'onde (fréquences basses) ou bleue si elle contient des radiations de longueur d'onde basse (fréquences élevées).

De la même façon et par analogie avec la lumière, lorsqu'un bruit traverse un filtre, certaines composantes sont atténuées. Le spectre n'est donc plus constant et on dit que le bruit est **coloré**.

- si les basses fréquences prédominent, on a un bruit **rose**
- si les fréquences élevées prédominent, on a un bruit **bleu**

Figure 9.
Spectre d'un
bruit blanc et
d'un bruit rose
dans la bande
audio.



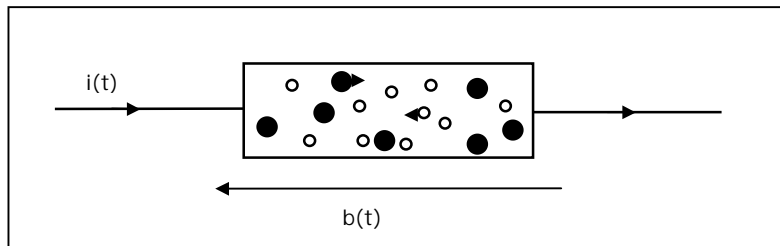
Les bruits roses sont utilisés pour tes tests audio (amplis, enceintes), car ils ont une puissance par octave ou par tiers d'octave constante.



6- Le bruit de grenaille

Considérons un barreau de matériau semi-conducteur muni à ses extrémités de deux contacts ohmiques.

Figure 10.
Les porteurs dans un semi-conducteur.



Le nombre $n(t)$ des porteurs (électrons et trous) présents dans le barreau n'est pas constant, mais fluctue autour d'une valeur moyenne et cette fluctuation est à l'origine d'une variation aléatoire de la tension $b(t)$.

- $b(t)$ fluctue au gré de la production et de la disparition de paires électron-trou : c'est le **bruit de génération-recombinaison** . Ce bruit existe même en l'absence de courant ($i(t)=0$).
- à cause du mouvement brownien (agitation thermique), les porteurs de charges s'entrechoquent et leur vitesse varie en permanence. La tension $b(t)$ fluctue en fonction de ces variations de vitesse : c'est le **bruit thermique**. Ce bruit existe même en l'absence de courant ($i(t)=0$)
- en présence de courant ($i(t) \neq 0$), $b(t)$ fluctue parce que le courant est constitué par une superposition de courants impulsionnels correspondant à la charge de l'électron : c'est le **bruit de grenaille**.

Le courant dans une jonction est lié à la circulation des porteurs (électrons et trous). Le courant électrique, qui paraît continu à l'échelle macroscopique, est donc au niveau microscopique constitué par un grand nombre d'impulsions de courant.

De ce fait, le courant fluctue très légèrement autour de sa valeur moyenne : c'est le **bruit de grenaille**.

Ce bruit augmente avec le courant I et est blanc jusqu'à une fréquence supérieure à 1GHz.

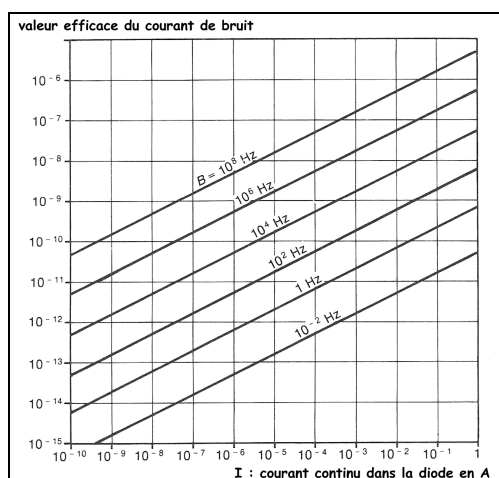
La valeur efficace de ce bruit en courant est donné par la formule de Schottky :

$$I_{eff} = \sqrt{2qI\Delta f}$$

avec $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

I courant continu dans la jonction
 Δf bande de fréquence utile

Figure 11.
Valeur efficace du bruit de grenaille en fonction de I et Δf .



Par exemple, pour une diode traversée par un courant de $I = 1 \text{ mA}$ et une bande de $\Delta f = 1 \text{ MHz}$, la valeur efficace du bruit en courant vaut :

$$I_{eff} = 18 \text{ nA.}$$

Ce bruit est prépondérant dans les diodes à vide ou à jonction.



7- Le bruit thermique

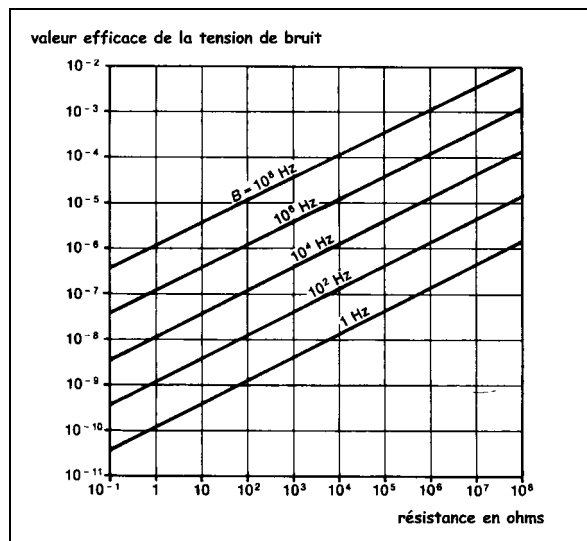
On démontre que la tension de bruit thermique apparaissant aux bornes d'une résistance R s'écrit :

$$B_{\text{eff}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \quad \text{avec : } k : \text{constante de Boltzman (} k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{)}$$

T : Température absolue en Kelvin
 Δf : bande passante utile

Exemple numérique : une résistance de $R = 100 \text{ kohms}$ à la température ambiante de 20 degrés ($T = 273 + 20 = 293 \text{ K}$) produit du bruit blanc. Un voltmètre de bande passante 1MHz indiquera une tension de bruit $B_{\text{eff}} = 40 \mu\text{V}_{\text{eff}} = 240 \mu\text{V}_{\text{cc}}$.

Figure 12.
Valeur efficace du bruit thermique en fonction de R et Δf .



Remarque : la formule nous montre qu'une résistance est d'autant plus bruyante que sa valeur est élevée.

Lorsqu'on veut réaliser un amplificateur à faible bruit, il faudra donc éviter d'utiliser des résistances de valeur trop élevée.

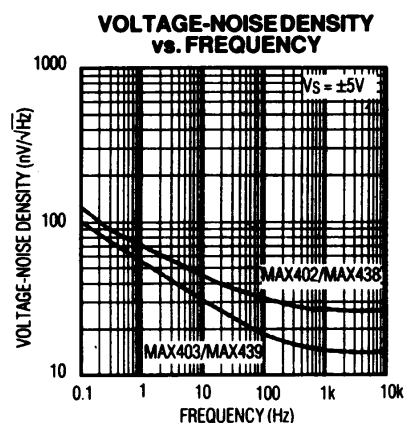
En effet, le fait de choisir une résistance de valeur 10 fois plus grande multiplie la tension de bruit par un facteur 3.

Ce bruit thermique est prépondérant dans les composants longs (longueur \gg distance moyenne entre 2 chocs), dans lesquels les chocs sont très nombreux durant la transition des porteurs d'une électrode à l'autre : résistances, barreaux de semi-conducteurs ...

Remarque : il existe 2 autres types de bruits appelés **bruits de génération-recombinaison** et **en 1/f** qui apparaissent surtout aux basses fréquences :

- le **bruit** de génération-recombinaison lié à la génération de paires électrons-trous se manifeste à des fréquences inférieures à une limite pouvant varier entre 10 kHz et 1 MHz
- le **bruit en 1/f** décroît avec la fréquence et apparaît non seulement dans les semi-conducteurs, mais aussi dans les résistances au carbone. La bande de fréquence où il est supérieur au bruit thermique tend à se rétrécir au fur et à mesure des progrès technologiques et ne dépasse pas quelques dizaines de Hz pour les meilleures technologies actuelles.

Figure 13.
Augmentation du bruit aux basses fréquences dans un AOp.



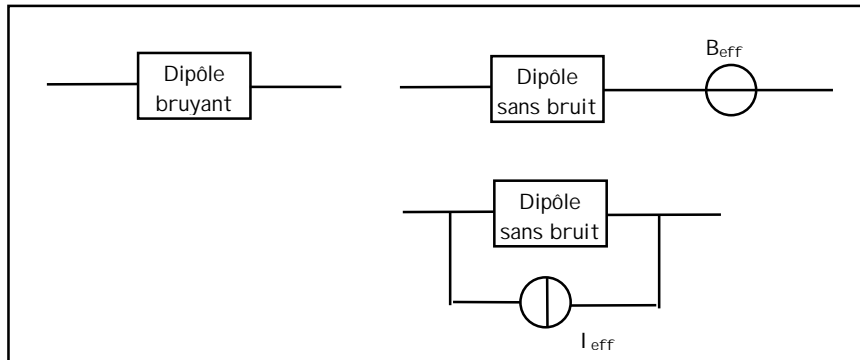
L'existence de ces deux types de bruits se retrouve sur toutes les caractéristiques de bruits de composants actifs, qui présentent tous une remontée du niveau de bruit aux très basses fréquences.



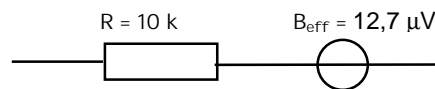
8- Modélisation d'un dipôle bruyant

Un dipôle bruyant sera représenté par un dipôle sans bruit associé à une source de bruit selon un modèle qui peut être de Thévenin ou de Norton.

Figure 14.
Modèles d'un
dipôle bruyant.



Par exemple, une résistance de $R = 10 \text{ k}\Omega$ à la température de 20 degrés produit dans une bande de fréquence $\Delta f = 1 \text{ MHz}$ une tension de bruit $U_{\text{eff}} = 4kTR\Delta f^{1/2} = 12,7 \text{ }\mu\text{V}$. Elle sera modélisée par le schéma suivant :



Soit un dipôle bruyant ayant une résistance interne R_o . Si ce dipôle produisait uniquement du bruit thermique, on aurait à ses bornes une tension de bruit :

$$B_{\text{th}} = 4kTR_o\Delta f^{1/2} \text{ soit une puissance de } P_{\text{th}} = B_{\text{th}}^2/R$$

En réalité, le dipôle génère un bruit B supérieur au seul bruit thermique, de puissance P_b .

Le facteur de bruit F du dipôle caractérise cet excès du bruit réel par rapport au bruit thermique :

$$F = \frac{P_b}{P_{\text{th}}} = \frac{U_b^2}{U_{\text{th}}^2} = \frac{U_b^2}{4kTR_o\Delta f}$$

Ce facteur de bruit est forcément supérieur ou égal à 1. On parle souvent de bruit en excès (Excess Noise Ration des anglo-saxons) défini par :

$$\text{ENR} = F - 1$$

Exemple : un dipôle de résistance interne $R_o = 10 \text{ k}$ produit un bruit de $B = 20 \text{ }\mu\text{V}$ dans une bande de 1 MHz.

Le bruit thermique « normal » serait de $B_{\text{th}} = 12,7 \text{ }\mu\text{V}$

Le facteur de bruit de ce dipôle vaut : $F = 20^2/12,7^2 = 2,48 = \mathbf{3,9 \text{ dB}}$

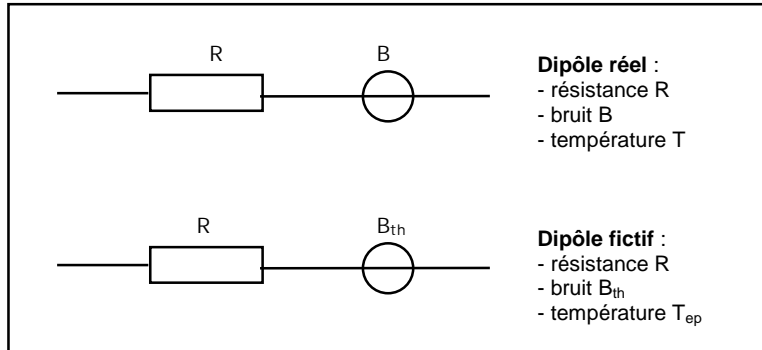
et son taux de bruit en excès : $\text{ENR} = F - 1 = 1,48 = \mathbf{1,7 \text{ dB}}$



9- Température équivalente de bruit

Elle est définie comme la température fictive T_{eq} à laquelle il faudrait porter le dipôle fictif à bruit uniquement thermique pour qu'il présente un bruit identique à celui du dipôle réel à la température réelle T .

Figure 15.
Température de bruit d'un dipôle.



L'équivalence entre les deux bruits se traduit par la relation :

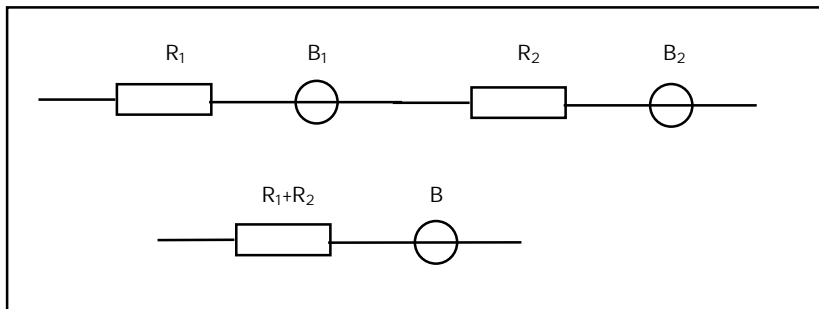
$$B = B_{th} = \sqrt{4kT_{eq}R\Delta f}$$

Dans l'exemple précédent, la température équivalente de bruit serait de $T_{ep} = B^2/4kR\Delta f = 714 \text{ K}$.

Lorsqu'on associe deux dipôles, les sources de bruit U_1 et U_2 se combinent et la valeur efficace du bruit résultant U_{eff} vaut :

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$

Figure 16.
Association de dipôles bruyants en série.



Une formule du même type s'applique pour les sources de courant de bruit.

Exemple : on place en série un dipôle de résistance $R_1 = 10 \text{ k}$ ayant un facteur de bruit de $F = 5\text{dB}$ avec une résistance $R_2 = 47 \text{ k}$.

Ces éléments sont à 20 degrés et on s'intéresse au bruit dans la bande 0-100 MHz.

- le bruit thermique de la résistance R_1 vaut $B_{th1} = 4kTR_1\Delta f^{1/2} = 127 \mu\text{V}$
- le bruit réel produit par ce dipôle vaut $B_1 = U_{th1} \cdot F^{1/2} = 226 \mu\text{V}$
- le bruit thermique produit par R_2 vaut $B_2 = 4kTR_2\Delta f^{1/2} = 276 \mu\text{V}$

- la résistance équivalente s'écrit

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

- le bruit total produit vaut

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = 357 \mu\text{V}$$

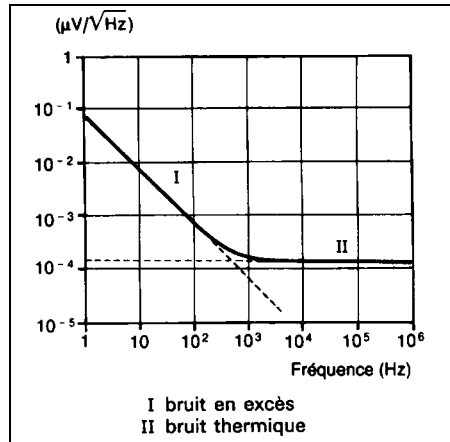


10- Bruit des composants réels

Le bruit total d'une **résistance R** comprend le bruit thermique et le bruit en excès (bruit basse-fréquence en $1/f$) dépendant du courant qui la traverse.

La densité spectrale de puissance présente donc une remontée vers les basses fréquences.

Figure 17.
Densité spectrale du bruit d'une résistance de 10k .



En général, les **condensateurs** ne posent pas de problème de bruit car la capacité idéale est non bruyante.

Une capacité réelle possède une résistance série et une résistance de fuite parallèle. Les composantes de bruit thermique de celles ci sont usuellement négligeables.

Dans le domaine des basses fréquences, où la capacité ne shunte pas effectivement la source interne de courant de bruit, le bruit en excès se manifeste. dans les capacités de couplage du type électrolytique. à chaque renversement de tension aux bornes du condensateur et pendant une durée de quelques minutes à quelques heures.

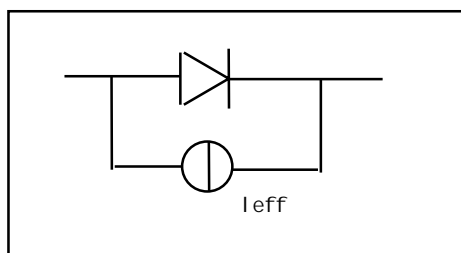
Pour empêcher cet effet nuisible, on peut soit concevoir le circuit de telle sorte qu'à aucun moment la tension ne se renverse aux bornes de la capacité, soit mettre deux capacités en série montées en opposition de polarité, soit placer une diode au silicium à faible fuite, en parallèle sur la capacité, qui limitera la tension inverse appliquée.

Le bruit dans une **diode** ou jonction PN est essentiellement un bruit de grenaille dépendant donc du courant de polarisation I traversant la diode.

Le schéma équivalent au point de vue du bruit d'une diode sera donc constitué de deux éléments placés en parallèle :

- une diode parfaite sans bruit
- une source de bruit de grenaille

Figure 18.
Modèle d'une diode bruyante .

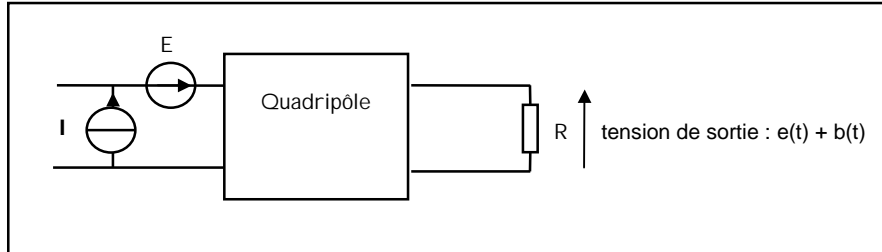




11- Schéma équivalent d'un quadripôle bruyant

Le bruit en sortie d'un quadripôle est produit par tous les composants internes au quadripôle. On peut caractériser le bruit total en sortie en introduisant deux sources de bruit, une de tension U et une de courant I , placées à l'entrée du quadripôle. C'est le modèle le plus fréquemment utilisé.

Figure 19.
Schéma
équivalent d'un
quadripôle
bruyant. .



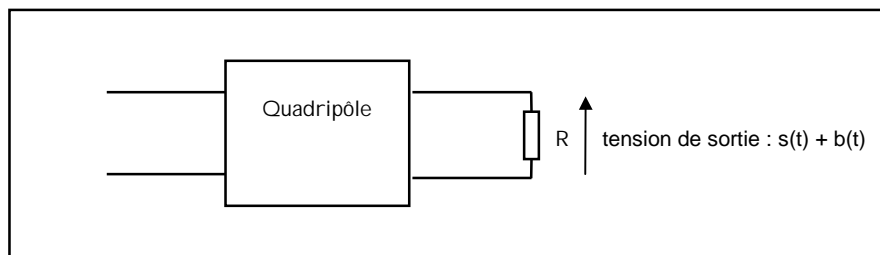
Un quadripôle réel peut être défini du point de vue du bruit de deux façons :

- en définissant les 2 sources de bruit E et I à l'entrée
- par son facteur de bruit

Les fabricants d'amplificateurs opérationnels par exemple spécifient toujours leurs composants en donnant les densités spectrales des deux sources E et I .

Soit un quadripôle fournissant un signal $s(t)$ de valeur efficace S à une résistance de charge R . Ce signal est affecté d'un bruit $b(t)$ de valeur efficace B

Figure 20.
Bruit en sortie
d'un quadripôle



On définit alors le **rapport signal/bruit S/B** en sortie du quadripôle par la relation :

$$(S/B)_{dB} = 10 \log \left(\frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du bruit}} \right) = 10 \log \left(\frac{S^2/R}{B^2/R} \right) = 20 \log(S/B)$$

Le rapport signal sur bruit est simplement le rapport entre valeur efficace du signal et valeur efficace du bruit exprimé en dB.

Exemples

- soit un signal sinusoïdal d'amplitude crête-crête 1V et affecté d'un bruit de valeur efficace 1mV. La valeur efficace du signal vaut $S = 0,354$ V et le rapport $S/B = 20 \log 0,354/0,001 = 51$ dB
- un bon amplificateur a en sortie un rapport S/B de 90 dB au moins. Sachant qu'il délivre en sortie un signal de 30 V_{eff} quelle est la valeur maximale de la tension de bruit en sortie ?

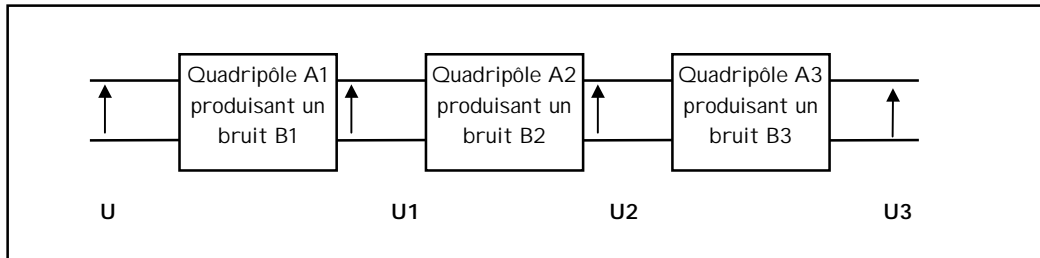
$$S/B = 90 \text{ dB donc } S/B = 10^{90/20} = 31622 \quad \text{d'où : } B = S/31622 = 1\text{mV environ}$$



12- Bruit dans une chaîne d'amplification

Soit une chaîne de trois amplificateurs A1, A2 et A3 en cascade dont la tension d'entrée est notée U.

Figure 21.
Bruit en sortie
d'une chaîne de
quadripôles.



Chaque amplificateur amplifie le signal appliquée à son entrée et rajoute son bruit propre B1, B2 ou B3 .
Calculons la tension en sortie :

$$\begin{aligned} U_1 &= A_1.U + B_1 & U_2 &= A_2.U_1 + B_2 = A_2.A_1.U + A_2.B_1 + B_2 \quad \text{et} \\ U_3 &= A_3.U_2 + B_3 = A_3.A_2.A_1.U + A_3.A_2.B_1 + A_3.B_2 + B_3 \end{aligned}$$

Le bruit en sortie s'exprime donc en fonction du bruit propre des trois étages :

$$B_s = B_1.A_2.A_3 + B_2.A_3 + B_3$$

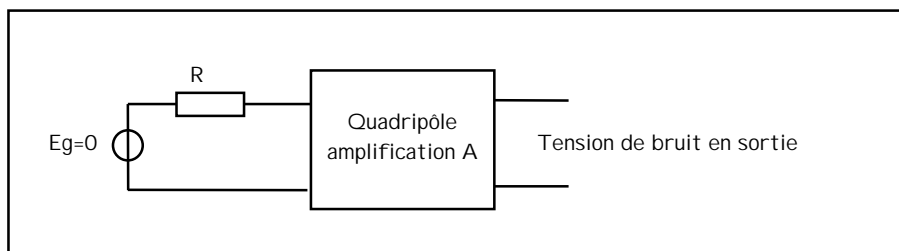
Dans cette formule, le terme le plus gênant est le premier, puisque le bruit B1 est amplifié deux fois.
Dans une chaîne, c'est donc **le premier étage** qui est **le plus important** du point de vue du bruit.

On s'efforcera donc dans tous les cas de minimiser le bruit propre du premier étage d'une chaîne de traitement du signal :

- dans un récepteur, c'est l'amplificateur HF d'entrée, qui reçoit les signaux de faible amplitude de l'antenne, qui doit être à faible bruit.
- dans un ampli basse fréquence, ce sont les préamplificateurs qui seront soignés au point de vue du bruit.

Nous avons vu qu'un amplificateur, comme tout quadripôle, rajoute au signal qu'il amplifie son bruit propre.

Figure 22.
Le facteur de
bruit d'un
quadripôle.



On caractérise souvent l'amplificateur par son **facteur de bruit F** . Si on éteint la source ($e_g = 0$), on n'aura que du bruit en sortie. Ce bruit est constitué de 2 termes :

- le bruit de la résistance de la source R_g amplifié : $B_s = B_r.A$
- le bruit rajouté par l'ampli : B_a

Le facteur de bruit de l'ampli vaut alors :

$$F = \frac{B_s^2 + B_a^2}{B_s^2} = 1 + \frac{B_a^2}{B_s^2}$$

- le facteur de bruit est toujours supérieur à 1 (égal à 1 pour un ampli idéal sans bruit)
- le facteur de bruit est donné en général en dB ($10\log F$)
- un facteur de bruit de 3 dB caractérise un bon ampli
- un facteur de bruit 1 caractérise un très bon ampli
- un facteur de bruit à 5 caractérise un ampli moyen
- pour une chaîne : $F = F_1 + \frac{(F_2-1)}{A_1} + \frac{(F_3-1)}{A_1A_2} + \dots \approx F_1$ si $A_1 \gg 1$



13- Filtrage d'un bruit

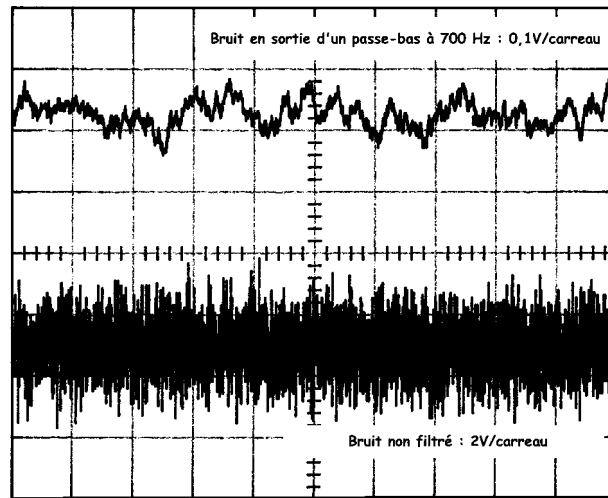
Faisons passer un bruit de valeur efficace B et de bande Δf dans un filtre de largeur $\Delta f'$ (avec $\Delta f' < \Delta f$). La valeur efficace du bruit à l'entrée s'écrit : $B = K\sqrt{\Delta f}$

La valeur efficace du bruit en sortie vaut : $B' = K\sqrt{\Delta f'}$

d'où la relation :
$$B' = B \sqrt{\frac{\Delta f'}{\Delta f}}$$

Lorsqu'on filtre un bruit, on modifie toujours sa valeur efficace, son allure temporelle et son spectre.

Figure 23.
Influence du filtrage sur l'allure temporelle d'un bruit.



Exemple 1 : on applique à l'entrée d'un amplificateur de gain $A_v = 100$ et de bande passante 20 kHz un signal sinusoïdal de valeur $0,1 V_{eff}$ affecté d'un bruit de valeur efficace $100 \mu V$ et de bande 1 MHz.

- a l'entrée : $S/Be = 20\log(0,1/0,0001) = 60 \text{ dB}$
- a la sortie : signal : $0,1 \cdot A_v = 10$ bruit = (bruit à l'entrée) $\cdot A_v \cdot \sqrt{\Delta f' / \Delta f} = 1,4 \text{ mV}$

$(S/B)_s = 20\log(10/0,0014) = 77 \text{ dB}$ le rapport S/B a été amélioré.

Pour avoir le meilleur rapport signal/bruit, on a intérêt à se fixer une bande passante couvrant juste la largeur du spectre du signal à amplifier.

Exemple 2 : il est intéressant de noter que, si le bruit à l'entrée est un bruit blanc, le spectre en sortie reproduit la forme de la courbe de réponse du filtre.

Figure 24.
Spectre d'un bruit blanc à la sortie d'un filtre LC sélectif centré sur 580 kHz.

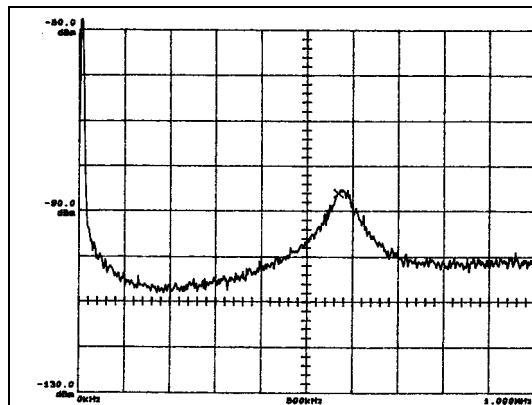
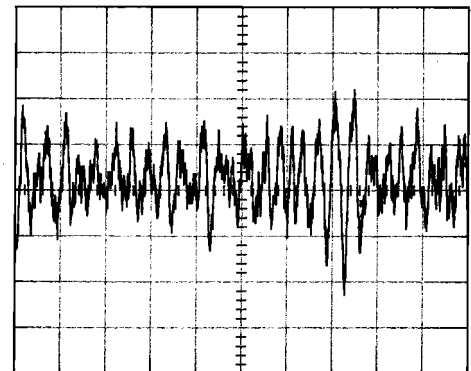


Figure 25.
Allure temporelle d'un bruit blanc à la sortie d'un filtre LC sélectif centré sur 580 kHz.



On retrouve dans le signal en sortie du filtre les composantes du spectre autour de 580 kHz et un bruit en sortie d'un filtre sélectif se rapproche d'un signal sinusoïdal.



14- La densité spectrale de bruit

On utilise très souvent, pour caractériser le bruit à une fréquence f_0 donnée, la notion de densité spectrale de bruit.

Cette densité spectrale est simplement la tension de bruit qu'on aurait dans une bande de 1 Hz autour de f_0 .

Prenons comme exemple une résistance de valeur $R = 100 \text{ k}\Omega$ à température ambiante :

- le bruit thermique à ses bornes vaut $B_{eff} = \sqrt{4kTR\Delta f} = 40 \mu V$ dans une bande de 1 MHz
- la densité spectrale de bruit vaut : $D = \frac{\sqrt{4kTR\Delta f}}{\sqrt{\Delta f}} = \sqrt{4kTR} = 40 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

Les caractéristiques constructeur des dispositifs (Aop par exemple) précisent toujours la valeur de la densité spectrale de bruit, et non la tension de bruit qui est liée à la bande passante du système, et donc des composants qui se trouvent dans le montage.

Le tableau ci-dessous donne les grandeurs caractéristiques de bruit (densité spectrale de la source de tension de bruit et de la source de courant de bruit) de quelques amplificateurs opérationnels à transistors bipolaires et à effet de champ, à faible bruit.

Figure 26.
Caractéristiques
de quelques
AOp à faible
bruit.

Caractéristiques de bruit d'AOp.					
Générateurs de bruit		Amplificateur opérationnel à transistors bipolaires		Amplificateur opérationnel à transistors à effet de champ	
		OPA 37A	LT 1028	OPA 111BM	OPA 627BM
E_n (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	10 Hz	3,1	1,0	30	30
	30 Hz	2,9	0,95	21	18
	1 kHz	2,7	0,85	7	5,2
I_n (fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	10 Hz	1 700	4 700	0,4	1,6
	30 Hz	1 000	2 900	0,4	1,6
	1 kHz	400	1 000	0,4	1,6
Tension de bruit crête-crête (nV) (0,1 Hz à 10 Hz)		80	35	1 200	1 200
Courant de bruit crête-crête (fA) (0,1 Hz à 10 Hz)				7,5	30
1 fA = 10^{-15} A. Les valeurs crête-crête ont, dans la littérature, l'indice pp (<i>peak-peak</i>).					

Les constructeurs donnent des valeurs des densités spectrales à 1 Hz, 30 Hz, 1 kHz en moyenne quadratique par unité de bande et une valeur de bruit crête-crête mesurée dans la bande standard 0,1 Hz - 10 Hz.

- on se rend compte que les courants de bruit I_n sont bien plus faibles dans les amplificateurs opérationnels possédant sur les entrées des transistors à effet de champ.
- par contre, les amplificateurs opérationnels à entrée à transistor bipolaire possèdent une plus faible tension de bruit E_n en basse fréquence que ceux à TEC.



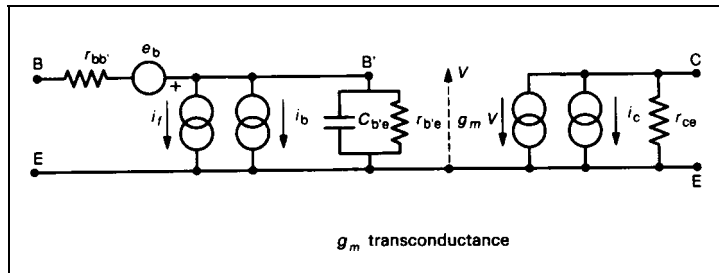
15- Bruit dans les composants actifs

Tous les composants actifs produisent leur bruit propre et on peut définir pour chacun d'eux un schéma équivalent pour le bruit qu'il faut utiliser si on veut calculer le niveau de bruit en sortie d'un étage.

Les logiciels de simulation actuels intègrent les paramètres de bruit dans les modèles et permettent donc d'avoir une idée précise du comportement d'un étage par rapport au bruit.

Pour un transistor, les sources de bruit correspondent aux bruits thermiques des différentes résistances du schéma équivalent et aux bruits de grenaille des différentes jonctions.

Figure 27.
Schéma
équivalent du
transistor
bipolaire..

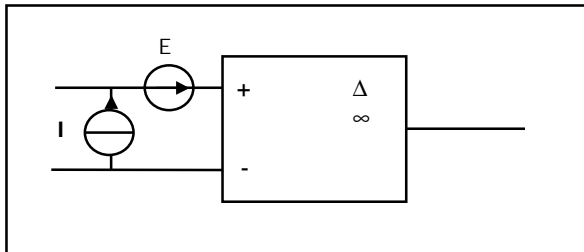


Les sources de bruit sont les sources de bruit de grenaille i_b et i_c , la source de bruit thermique e_b liée à la résistance de base $r_{bb'}$ et la source i_f de bruit en $1/f$.

Pour un amplificateur opérationnel, les sources de bruit sont très nombreuses puisque chaque composant résistif ou actif est à l'origine d'une ou de plusieurs sources de bruit.

Le fabricant spécifie donc son composant en donnant les densités spectrales de bruit de 2 sources de bruit placées à l'entrée qui remplacent la totalité des sources de bruit internes au composant.

Figure 28.
Schéma
équivalent de
l'AOp..

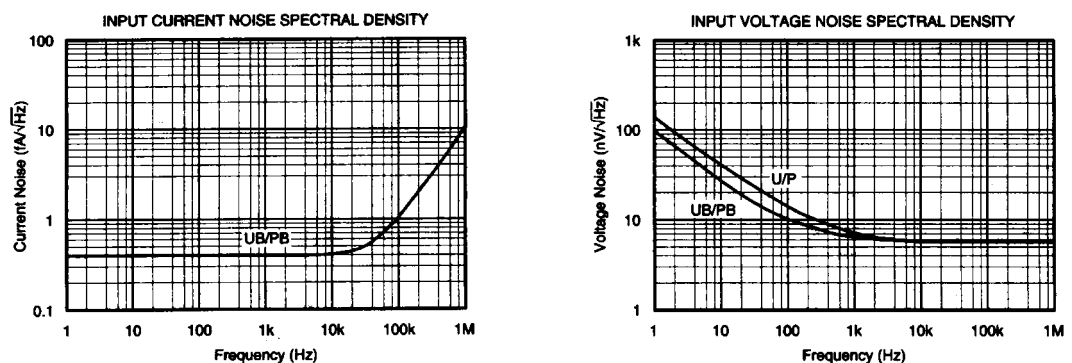


Lorsqu'on désire concevoir un étage à faible bruit, on choisira donc un amplificateur opérationnel dit « à faible bruit ».

Remarque :

Les fabricants donnent aussi souvent la courbe de la densité spectrale de bruit correspondant aux deux sources E et I.

Figure 29.
Caractéristiques
de bruit de
l'AOp OPA124 de
LT..





16- La mesure du bruit

⇒ lorsqu'une mesure d'une valeur efficace de bruit à l'aide d'un voltmètre, il faut veiller à la bande passante de l'appareil.

En effet, il faut que la bande passante B de l'appareil soit supérieure à la bande passante du bruit à mesurer si on veut éviter un filtrage du bruit et donc une diminution de sa valeur efficace mesurée.

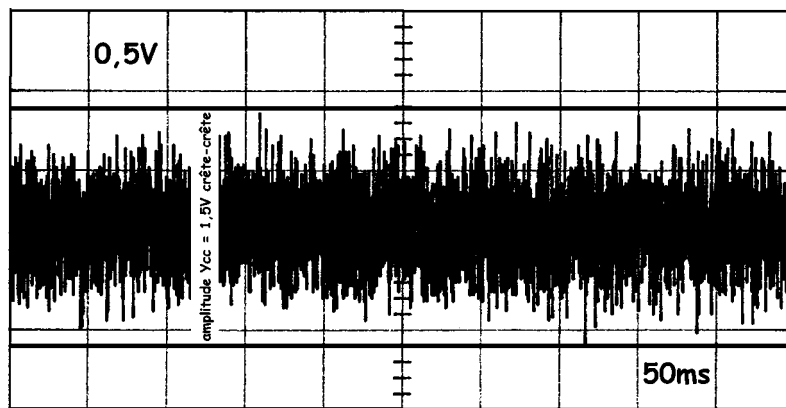
Sa sensibilité aussi doit être suffisante pour pouvoir mesurer des tensions faibles.

⇒ une méthode à première vue très séduisante consiste à relier la source de bruit à l'entrée de la voie verticale d'un oscilloscope à large bande.

On observera dans ce cas l'oscillogramme de bruit qui correspond à la bande passante du système source - câble de raccordement - oscilloscope.

En présence d'un bruit blanc à distribution gaussienne, on observera une « bande » illuminée de brillance maximum au milieu, et dont la hauteur Y_{cc} se conserve en principe pour toutes les vitesses de balayage.

Figure 30.
Mesure de la
tension de
bruit à
l'oscilloscope.



Cette hauteur Y_{cc} donne un ordre de grandeur de la valeur crête à crête B_{cc} de la tension de bruit visualisée et on peut calculer la valeur efficace par :

$$B_{eff} = Y_{cc}/6$$

Malheureusement, les crêtes de bruit étant réparties au hasard dans le temps, leur « visibilité » s'avère être fonction du réglage de brillance (intensité de la trace, de la vitesse de balayage, de la persistance de la trace, de l'éclairage ambiant, et dans une certaine mesure même de la durée d'observation).

La mesure de Y_{cc} - et donc de B_{cc} - risque donc d'être plus ou moins subjective et variable avec les conditions d'utilisation de l'oscilloscope et l'erreur de mesure peut atteindre 50%.

On peut faire une mesure plus précise à l'oscilloscope en utilisant la méthode oscilloscopique tangentielle.

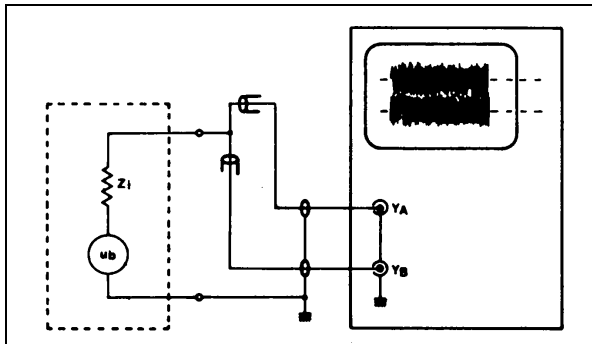
Cette méthode, à la fois simple et assez spectaculaire, est basée sur le fait que deux distributions gaussiennes identiques peuvent être combinées de manière à donner une courbe résultante à un seul maximum, sans creux, lorsque ces deux distributions sont exactement séparées par deux fois l'écart-type σ .



17- La mesure oscilloscopique tangentielle

Le mode opératoire est particulièrement facile: il suffit d'appliquer le signal de bruit aux deux canaux YA et YB d'un oscilloscope double trace à large bande fonctionnant dans le mode de balayage alterné.

Figure 31.
Mise en oeuvre
de la méthode
oscilloscopique
tangentielle.



Deux oscillogrammes de bruit apparaissent alors sur l'écran. séparés par une « bande noire ».

Les sensibilités des deux canaux étant supposées identiques., il suffit de réaliser le déplacement vertical des deux oscillogrammes jusqu'à leur recouvrement tel que la « bande noire » entre les deux disparaît tout juste.

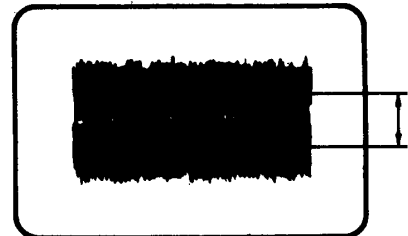
On déconnecte ensuite le signal de bruit : la distance A entre les deux traces est égale au double de la valeur efficace du signal de bruit.

$$B_{eff} = A/2$$

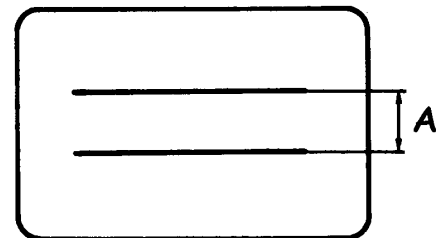
1 - le bruit est appliqué sur les 2 voies



2 - on rapproche les 2 traces



3 - on met les 2 entrées à zéro et on mesure A



En utilisant cette méthode particulièrement simple, l'erreur de mesure ne dépasse pas 10%, et cette technique est indépendante du réglage de luminosité de l'oscilloscope.



18- La mesure du bruit à l'analyseur de spectre

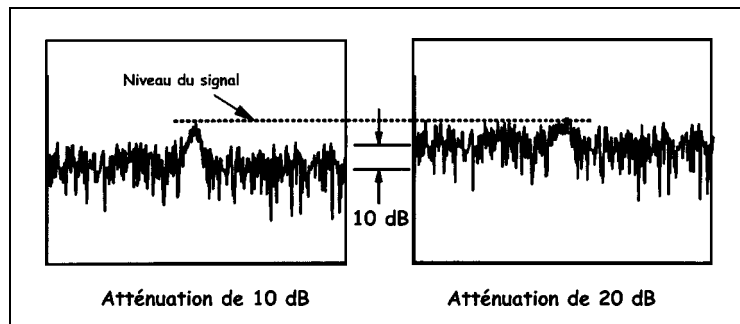
L'analyseur de spectre se prête bien à la mesure de rapport Signal/Bruit. Le bruit lié au signal et le bruit propre de l'analyseur se combinent pour donner la ligne de base sur l'affichage appelée **herbe** ou **plancher de bruit** (DANL : displayed average noise level).

Il sera évidemment impossible de mesurer un signal dont le niveau est inférieur au plancher de bruit. Ce niveau du plancher de bruit dépend essentiellement de deux facteurs :

- la position de l'atténuateur d'entrée
- la largeur du filtre fi RBW

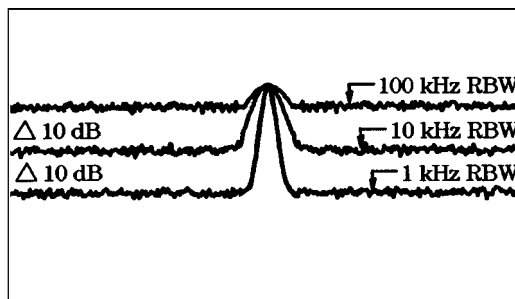
Le bruit de l'analyseur de spectre provient essentiellement du premier étage amplificateur fi après le mélangeur. De ce fait l'**atténuateur d'entrée** n'a pas d'action sur le niveau de bruit mais comme il atténue le signal il va dégrader le rapport signal/bruit.

Figure 33.
Influence de
l'atténuation
d'entrée sur le
plancher de
bruit



Dans un analyseur de spectre une augmentation de l'atténuation d'entrée est compensée par une augmentation équivalente du gain de l'ampli fi. C'est la raison pour laquelle on n'observe pas de variation de niveau du signal mais simplement une remontée du plancher de bruit.

Figure 34.
Influence de la
RBW sur le
plancher de
bruit

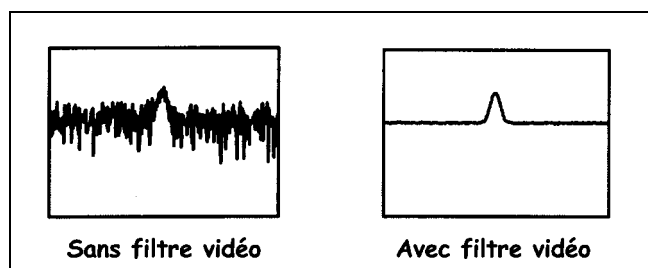


Le bruit thermique des amplificateurs de l'analyseur est un bruit blanc à large spectre. Ce bruit sera donc filtré par le filtre fi et le niveau de bruit affiché va dépendre de la RBW.

Le plancher de bruit descend de 10 dB chaque fois que la RBW est divisée par 10.

Nous avons vu précédemment que le rôle du filtre vidéo est simplement de lisser le signal affiché. Ce filtre n'a donc pas d'influence sur le plancher de bruit.

Figure 35.
Influence du
filtre vidéo sur le
plancher de bruit



Pour une **sensibilité optimale**, on utilisera donc les réglages suivants :

- bande passante fi (RBW) la plus faible possible
- atténuation RF d'entrée minimale
- filtrage vidéo efficace (Vidéo BW < 0,1 à 0,01 RBW)

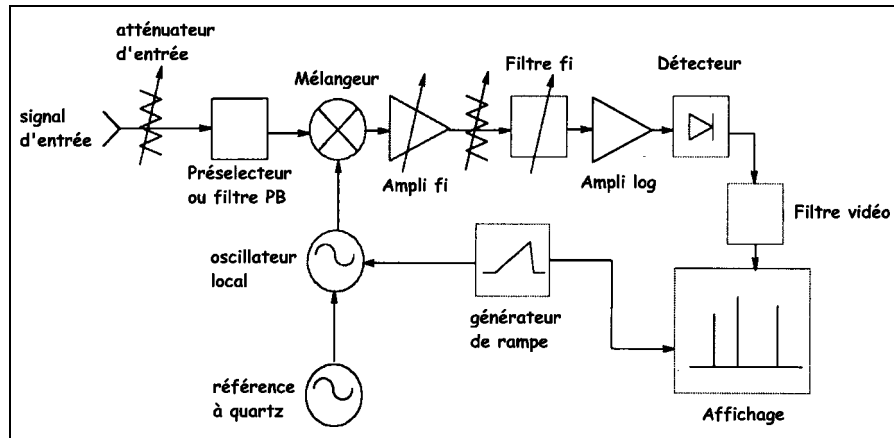
Une fois ces réglages effectués, on peut vérifier en débranchant le signal que le plancher de bruit baisse au moins de 10 dB. Le niveau mesuré sera alors bien le niveau de bruit présent dans le signal.



19- La mesure de la densité spectrale de bruit

L'analyseur de spectre travaille par balayage et fait, par changement de fréquence, passer le bruit devant le filtre f_i ce qui revient à déplacer le filtre f_i sur l'axe des fréquences.

Figure 36.
Principe de fonctionnement de l'analyseur à balayage.



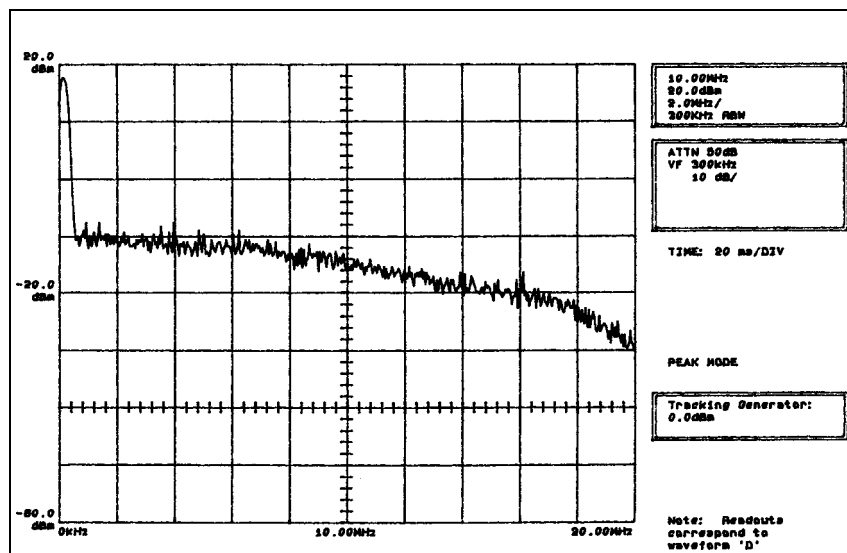
L'analyseur mesure donc le bruit en sortie du filtre f_i de résolution dont la largeur RBW peut être choisie parmi plusieurs valeurs :

niveau de bruit affiché = tension de bruit filtrée par le filtre de résolution RBW

Pour avoir une valeur de bruit indépendante de ce filtre, on ramène toujours la valeur de bruit mesurée à un intervalle de 1 Hz et le niveau de bruit sera donc exprimé en dBm/Hz. Cette quantité est appelée **densité spectrale de puissance**.

$$D_{\text{enV}/\sqrt{\text{Hz}}} = B_{\text{enV}} / \sqrt{\text{RBW}} \quad \text{soit en puissance} \quad D_{\text{dBm}/\text{Hz}} = B_{\text{endBm}} - 10\log(\text{RBW})$$

Figure 37.
Exemple de mesure de bruit à l'analyseur de spectre.



La bande passante de mesure vaut $\text{RBW} = 2 \text{ MHz}$ et le niveau mesuré à 10 MHz : $B = -16 \text{ dBm}$

- la densité spectrale de puissance de bruit à 10 MHz vaut :
 $D_{\text{dBm}/\text{Hz}} = -16 \text{ dBm} - 10\log(2 \cdot 10^6) = -79 \text{ dBm/Hz}$
- si ce bruit était blanc de 0 à 20 MHz, on aurait un niveau de bruit total de :
 $B_{\text{dBm}} = D_{\text{dBm}/\text{Hz}} + 10\log(\Delta f) = -6 \text{ dBm} = 0,112 \text{ V}_{\text{eff}} = 0,67 \text{ V}_{\text{crête-crête}}$

Remarque : sur les analyseurs de spectre modernes, le curseur de bruit (Noise cursor) indique directement la densité spectrale de bruit en dBm/Hz.



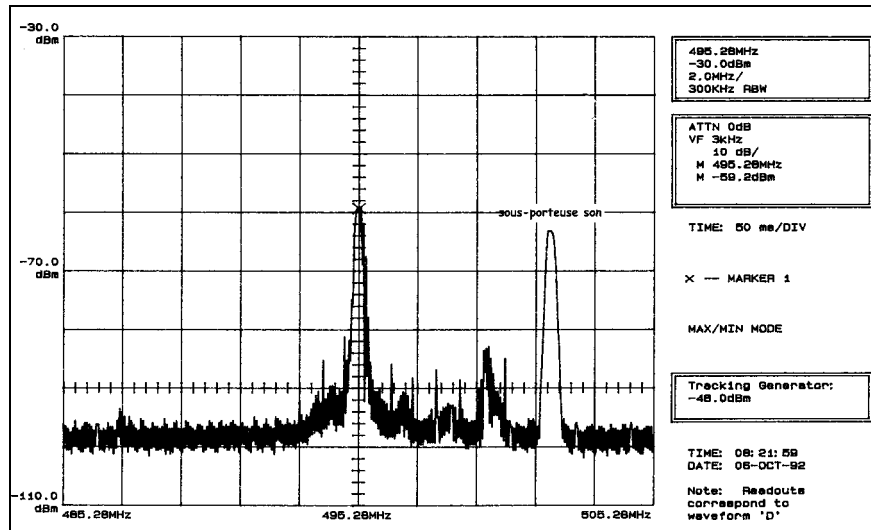
20- La mesure du rapport signal/bruit

La mesure du rapport signal/bruit S/B se fait très simplement avec l'analyseur de spectre.

Il faut simplement être conscient que la quantité qu'on mesure est le rapport S/B correspondant à une bande de bruit égale à la largeur RBW du filtre de résolution.

Si le signal observé est traité par un système dont la bande passante est différente de RBW, il conviendra d'en tenir compte pour le calcul du rapport S/B réel.

Figure 38.
Exemple de
mesure de
rapport S/B à
l'analyseur de
spectre.



Le signal de télévision ci-dessus est caractérisé par :

- un niveau de sous-porteuse son de $S = -63 \text{ dBm}$
- un niveau de bruit de $B = -98 \text{ dBm}$ si la bande d'analyse vaut $\text{RBW} = 2 \text{ MHz}$
- une densité spectrale de puissance de bruit de $D = -98 - 10\log(2 \cdot 10^6) = -161 \text{ dBm/Hz}$
- un rapport signal/bruit valant : $S/B = 35 \text{ dB}$

Cette sous-porteuse son est traitée par le tuner (facteur de bruit $F = 3\text{dB}$) puis traverse le filtre fi son de largeur $\Delta f = 30 \text{ kHz}$ (son en modulation d'amplitude, spectre limité à 15 kHz).Le gain total de la chaîne de réception est de $G = 40\text{dB}$.

En sortie du filtre fi et avant démodulation, on aura :

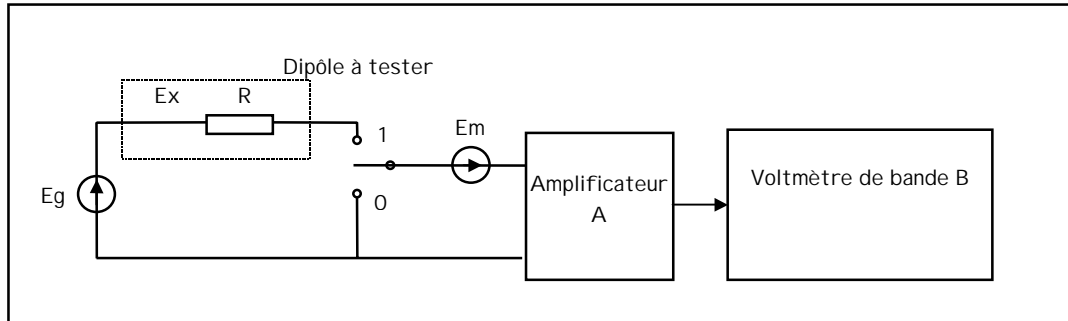
- un niveau de bruit de $B' = D + F + 10\log(30 \cdot 10^3) + G = -73 \text{ dBm}$
- un niveau de signal de $S' = S + G = -23 \text{ dBm}$
- un rapport signal/bruit $S/B = 50 \text{ dB}$
- une amélioration de 15 dB correspondant à un gain de $10\log(\text{RBW}/\Delta f) = 18\text{dB}$ du au filtrage et à une perte de 3 dB liée au bruit propre du tuner



21- Les montages de mesure du bruit global

⇒ la mesure du **bruit généré par un dipôle** se fait en utilisant une source de bruit blanc de niveau E_g connu. La source E_m représente le bruit propre de la chaîne de mesure.

Figure 39.
Montage de mesure du bruit d'un dipôle.



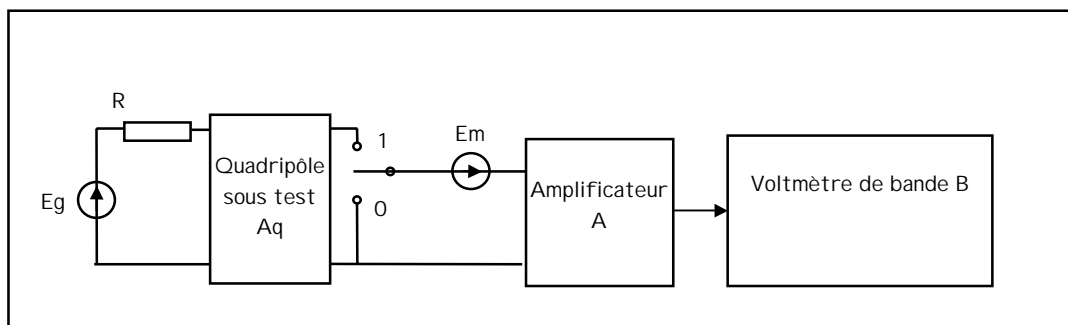
La mesure se fait en 3 temps :

- K en 0 : on mesure une tension : $V_1 = A \cdot E_m$
- K en 1, $E_g = 0$: $V_2 = \sqrt{E_m^2 + E_x^2}$
- K en 1, $E_g \neq 0$: $V_3 = \sqrt{E_m^2 + E_x^2 + E_g^2}$

On démontre aisément que :
$$E_x = E_g \cdot \sqrt{\frac{V_2^2 - V_1^2}{V_3^2 - V_2^2}}$$

⇒ un montage du même type s'applique à la **mesure du facteur de bruit F d'un quadripôle**.

Figure 40.
Montage de mesure du bruit d'un quadripôle.



On appelle E_q le bruit total en sortie du quadripôle.

La mesure se fait en 3 temps :

- K en 0 : on mesure une tension : $V_1 = A \cdot E_m$
- K en 1, $E_g = 0$: $V_2 = \sqrt{E_m^2 + E_q^2}$
- K en 1, $E_g \neq 0$: $V_3 = \sqrt{E_m^2 + E_q^2 + (A_q \cdot E_g)^2}$

Le facteur de bruit s'exprime par :

$$F = \frac{E_q^2}{(A_q \cdot E_r)^2} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{V_3^2 - V_2^2} \cdot \left(\frac{E_g}{E_r} \right)^2$$