

Relation entre facteur de bruit et température de bruit

Rédacteur : A. Gilloire - version du 08/03/2020 révisée le 29/04/2020

Facteur de bruit et température de bruit

On considère un quadripôle suivant la figure 1, avec à son entrée un générateur de tension E de résistance interne R_g et à sa sortie une résistance de charge R_u . On suppose que le quadripôle est adapté au générateur, c.à.d. que son impédance d'entrée est égale à R_g . On supposera aussi le quadripôle adapté en sortie, bien que cette condition ne soit pas nécessaire pour aboutir au résultat. La démonstration qui suit est valide dans une bande de fréquences suffisamment étroite pour que le gain du quadripôle soit constant, mais peut être étendue à une bande quelconque par intégration.

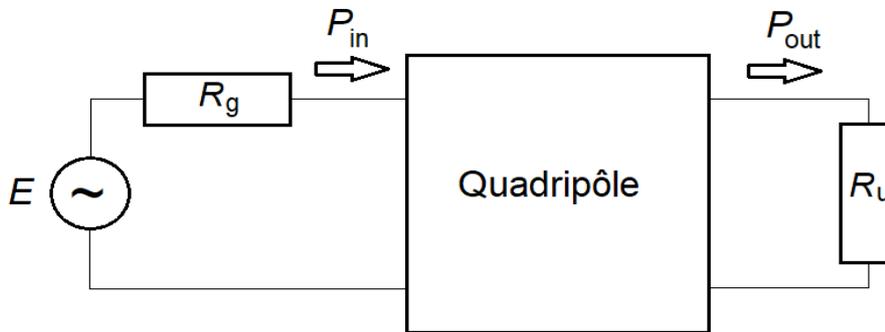


Figure 1 : quadripôle alimenté par un générateur de tension et chargé

La puissance P_{in} à l'entrée du quadripôle a deux composantes :

$$P_{in} = P_g + P_n \quad (1)$$

où $P_g = \langle E^2 \rangle / 4R_g$ est la puissance disponible fournie par le générateur adapté et P_n est la puissance du bruit d'origine externe au quadripôle.

La puissance P_{out} à la sortie du quadripôle a trois composantes :

$$P_{out} = P_{out,g} + P_{out,n} + P_{out,Q} \quad (2)$$

où $P_{out,Q}$ est la puissance du bruit propre du quadripôle à sa sortie. $P_{out,g}$ et $P_{out,n}$ sont les composantes de la puissance à l'entrée modifiées par le gain du quadripôle.

Le facteur de bruit est défini ([1], [2], [3]) comme le quotient du rapport signal à bruit en entrée du quadripôle SNR_{in} par le rapport signal à bruit en sortie SNR_{out} , avec :

$$SNR_{in} = \frac{P_g}{P_n} \quad (3a) \quad SNR_{out} = \frac{P_{out,g}}{P_{out,n} + P_{out,Q}} \quad (3b)$$

Notant g le gain en puissance du quadripôle (supposé linéaire), on a :

$$P_{out,g} = g P_g \quad (4a) \quad P_{out,n} = g P_n \quad (4b)$$

Par commodité et pour se débarrasser du gain g , on considère la puissance du bruit propre du quadripôle ramenée à l'entrée de celui-ci, soit :

$$P_Q = \frac{P_{out,Q}}{g} \quad (5)$$

Le rapport signal à bruit en sortie (3b) s'écrit alors :

$$SNR_{out} = \frac{P_g}{P_n + P_Q} \quad (6)$$

et le facteur de bruit s'écrit :

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{P_n + P_Q}{P_n} = 1 + \frac{P_Q}{P_n} \quad (7)$$

Le facteur de bruit d'un quadripôle bruyant est donc toujours supérieur à 1.

Supposons maintenant que la résistance R_g à l'entrée du quadripôle soit à la température T_{ref} . La puissance de bruit Johnson fournie par cette résistance dans la bande considérée B s'écrit :

$$P_n = k T_{ref} B \quad (8)$$

où k est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

Par définition, la puissance de bruit propre du quadripôle ramenée à son entrée est égale à la puissance de bruit Johnson fournie par une résistance portée à la température équivalente T_{eq} . On a donc :

$$P_Q = k T_{eq} B \quad (9)$$

et le facteur de bruit (7) s'écrit :

$$F = 1 + \frac{T_{eq}}{T_{ref}} \quad (10)$$

qui est la relation liant le bruit propre d'un quadripôle à sa température équivalente de bruit. Cette relation est très générale : hormis la linéarité, aucune hypothèse n'a été faite sur la nature du quadripôle. Noter que seule la composante ohmique (non réactive) des puissances intervient dans le raisonnement.

La température de référence est en général choisie égale à la température ambiante moyenne, soit 290 K ou 300 K. La donnée du facteur de bruit d'un équipement (en général en dB) doit normalement être associée à celle de la température de référence.

Les figures 2 et 3 représentent la température de bruit en fonction du facteur de bruit en dB pour les deux températures de référence 290 K et 300 K. La figure 3 est un zoom de la figure 2 sur les valeurs du facteur de bruit inférieures à 1 dB, qui correspondent aux performances des amplificateurs à faible bruit actuels. Le tableau 1 affiche les valeurs numériques des courbes représentées figure 3.

Exemple 1 : chaîne de réception PB8 à 4000 MHz en 2019 : la sortie de l'antenne est appliquée à un LNB California Amplifier MAG-7 modèle n° C31244, donné pour la température de bruit de 30 K dans sa bande passante 3700 à 4200 MHz (sans plus de précisions). D'après la figure 3, le facteur de bruit se situe à environ 0,42 dB (la température de référence choisie par le constructeur est probablement 25°C, soit 298 K, d'après les fiches techniques de produits plus récents).

Exemple 2 : LNA à 5760 MHz en entrée réception de la balise lunaire : modèle MKU LNA 572 AF de Kuhne Electronics, donné pour un facteur de bruit typique de 0,7 dB à 18°C, soit 291 K et une bande passante de 100 MHz autour de 5760 MHz. On lit sur la figure 3 une température équivalente de bruit légèrement au-dessus de 50 K.

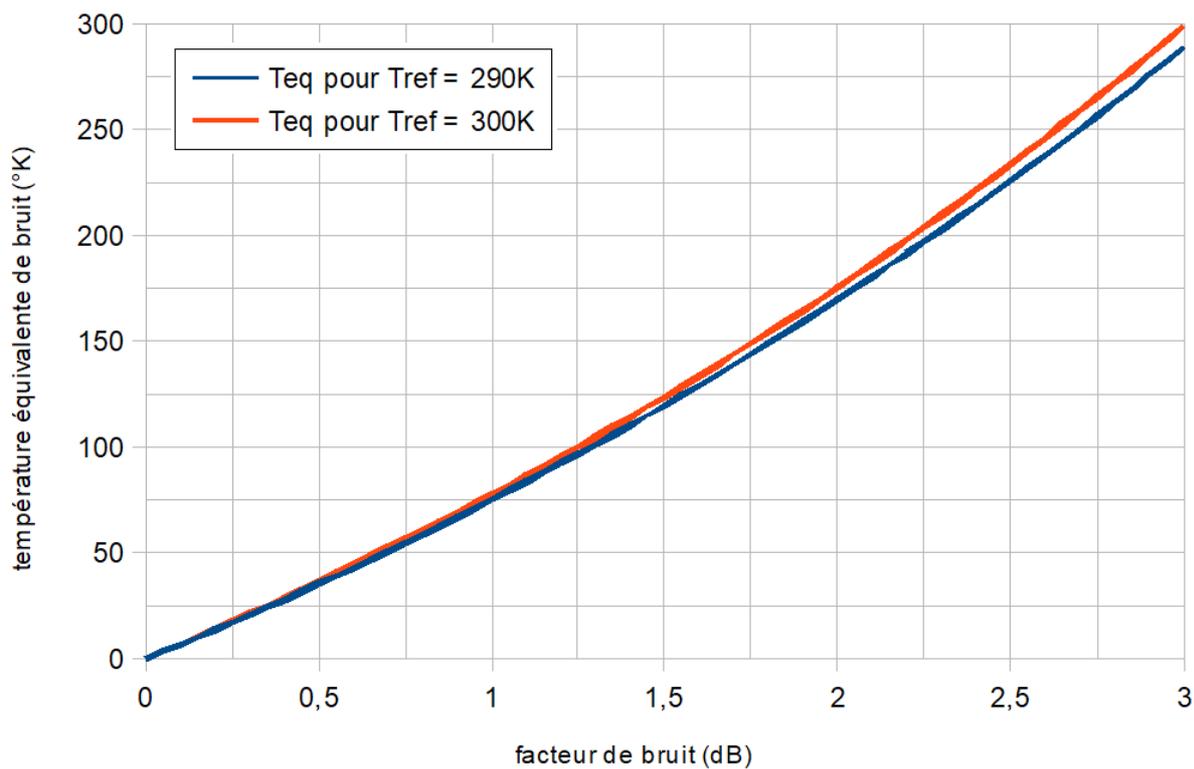


Figure 2 : température de bruit en fonction du facteur de bruit (en dB) pour les deux températures de référence 290 K et 300 K.

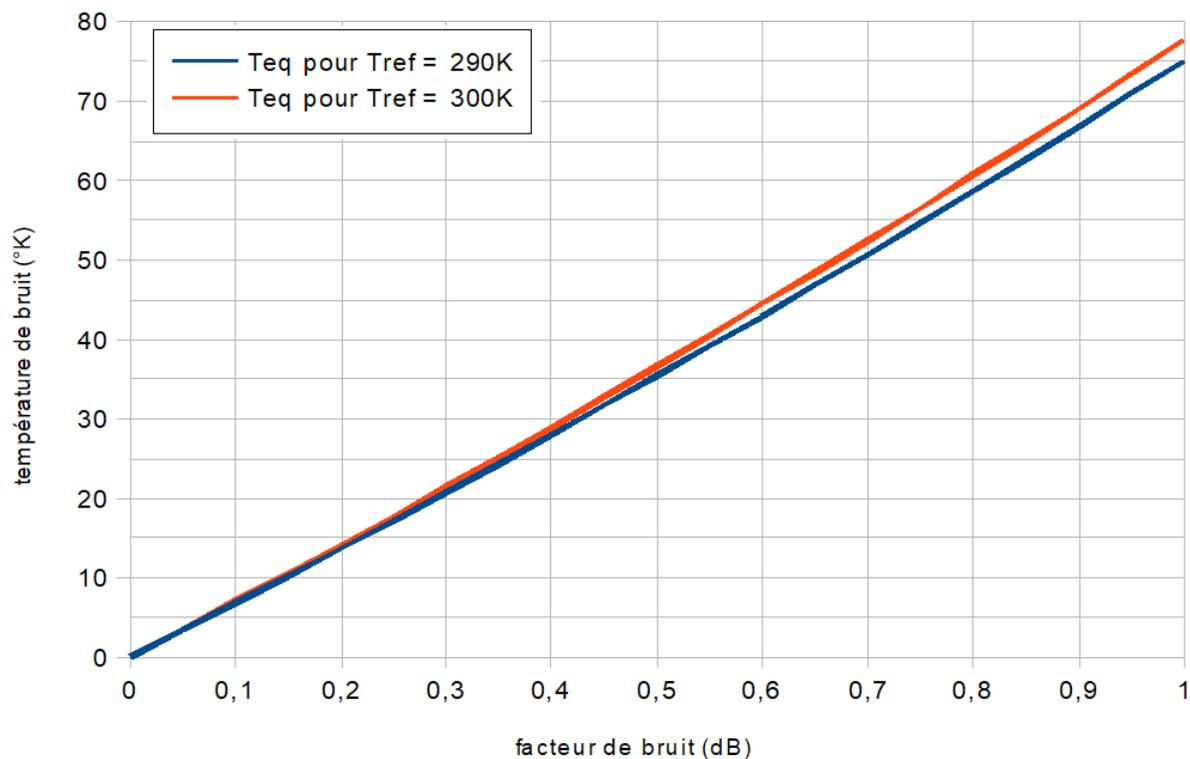


Figure 3 : idem figure 2 pour les valeurs du facteur de bruit inférieures à 1 dB

Facteur de bruit (dB)	Facteur de bruit (lin.)	T_{eq} (K) pour $T_{ref} = 290$ K	T_{eq} (K) pour $T_{ref} = 300$ K
0,00	1,00	0,0	0,0
0,05	1,01	3,4	3,5
0,10	1,02	6,8	7,0
0,15	1,04	10,2	10,5
0,20	1,05	13,7	14,1
0,25	1,06	17,2	17,8
0,30	1,07	20,7	21,5
0,35	1,08	24,3	25,2
0,40	1,10	28,0	28,9
0,45	1,11	31,7	32,8
0,50	1,12	35,4	36,6
0,55	1,14	39,2	40,5
0,60	1,15	43,0	44,5
0,65	1,16	46,8	48,4
0,70	1,17	50,7	52,5
0,75	1,19	54,7	56,6
0,80	1,20	58,7	60,7
0,85	1,22	62,7	64,9
0,90	1,23	66,8	69,1
0,95	1,24	70,9	73,4
1,00	1,26	75,1	77,7

Tableau 1 : température de bruit T_{eq} en fonction du facteur de bruit (en dB et linéaire) pour les deux températures de référence 290 K et 300 K

Références bibliographiques

[1] Friis, H.T., "Noise Figures of Radio Receivers", *Proceedings of the IRE*, Volume: 32, Issue: 7, Pages: 419- 422, Jul. 1944.

[2] Goldberg, H., "Some Notes on Noise Figures", *Proceedings of the IRE*, Volume: 36, Issue: 10, Pages: 1205-1214, Oct. 1948.

[3] Pierce, J.R., "Physical Sources of Noise", *Proceedings of the IRE*, Volume: 44, Issue: 5, Pages: 601-608, May 1956.

Ces trois articles historiques posent avec clarté le principe du facteur de bruit et son calcul dans différents cas de figure.

De nombreux livres et articles traitent du sujet. Voir par exemple cet ouvrage ancien mais dont la partie théorique est toujours valable :

van der Ziel, A., *Noise*. New York: Prentice-Hall, 1954.