

Comment ça marche ?

La température de bruit

Par le radio-club F6KRK

Nous avons vu dans le dernier "Comment ça marche" l'origine du bruit thermique et son effet dans les circuits électriques, effet caractérisé par le facteur de bruit. Nous allons maintenant voir une autre manière de considérer le bruit avec la température (équivalente) de bruit.

Facteur de bruit et puissance de bruit

Le facteur de bruit est un rapport qui qualifie l'accroissement de bruit amené par un système à une source de bruit référencée. Il est exprimé en décibels. Connaissant la référence et le facteur de bruit, on en déduit aisément la puissance de bruit générée par le système. Mais du fait de l'utilisation des logarithmes, la correspondance entre le facteur de bruit et la puissance de bruit n'est pas directe. Exemple :

Soit un **fb** de 3 dB. Alors **P_B** = -174 dBm.

Soit un **fb** de 1 dB. Alors **P_B** ≈ -180 dBm.

On voit qu'une diminution de 6 dB de la puissance de bruit se traduit par une diminution de 2 dB du facteur de bruit ⁽¹⁾. Et l'effet s'accroît avec la diminution de la puissance de bruit. Cela ne facilite pas les calculs lorsque l'on a à additionner plusieurs sources de bruit comme avec les antennes par exemple. On utilise alors une autre notion : la température équivalente de bruit qui est proportionnelle à la puissance de bruit.

La température équivalente de bruit.

La température équivalente de bruit (ou température de bruit pour simplifier) est la température à laquelle il faudrait mettre la résistance de référence pour qu'elle génère la même puissance de bruit que le dispositif. La formule mathématique qui permet de passer d'un facteur de bruit à une température de bruit est compliquée et il est plus simple d'utiliser l'abaque de la figure 1.

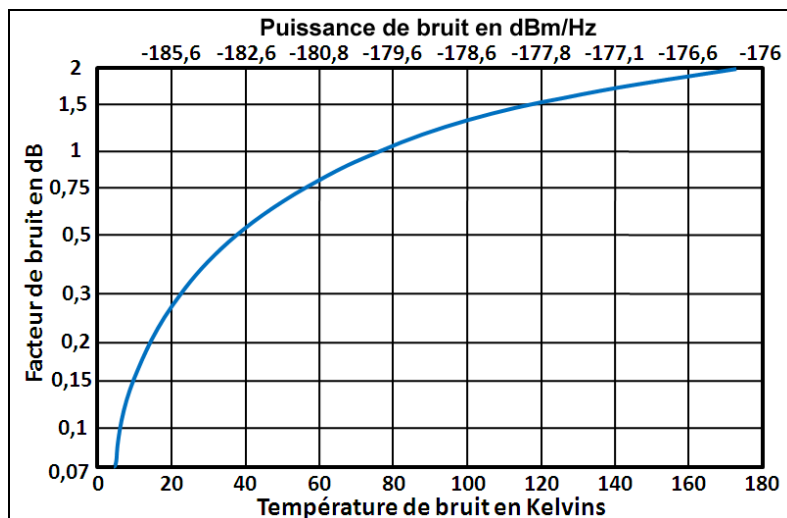


Figure 1 : Abaque de conversion facteur/température de bruit

Noter l'échelle Log pour le facteur de bruit. Elle s'arrête à 2 car la température de bruit est surtout employée pour les faibles facteurs de bruit.

Température de bruit d'un système antennaire.

Nous avons vu que le facteur de bruit intrinsèque d'une antenne était lié à ses pertes. C'était la considérer comme un dipôle simple. Mais une antenne est aussi un transducteur quadripôle ayant le champ électromagnétique comme source. Si le champ reçu est entaché de bruit, celui-ci s'additionne au bruit propre de l'antenne. Si une source de bruit se trouve dans le diagramme de rayonnement d'une antenne cela aura comme conséquence d'augmenter son facteur de bruit, donc sa température de bruit. On préfère calculer cette dernière puis la convertir au final en facteur de bruit à l'aide de l'abaque de la figure 1.

Les bruits dits "de fond" ⁽²⁾ captés par une antenne proviennent du sol et de l'espace avec pour origine l'agitation thermique des corps les constituant. En effet, l'énergie thermique qui n'est pas utilisée (consommée) par ailleurs, est rayonnée ⁽³⁾ et peut être captée par une antenne ⁽⁴⁾.

Donc pour toutes les liaisons qui se font dans la très basse atmosphère (liaisons troposphériques) la température moyenne du milieu étant de 15°C, le bruit ramené par l'antenne est celui de la référence (-174 dBm/Hz). Il en va de même pour le champ E-M réfléchi par le sol et tout objet terrestre. Dans ces conditions, on voit que le rapport S/B évolue comme le facteur de bruit et il ne sert à rien de descendre dans les fractions de dB.

Pour les antennes qui n'ont que l'espace dans leur diagramme de rayonnement, les sources de bruit sont par ordre de décroissance : celle du soleil, de la pleine lune, de notre galaxie, des constellations et du bruit de fond cosmologique (T=2,8K).

Pour des systèmes antennaires pointés vers des satellites, naturel (nouvelle lune) ou artificiels, il y a intérêt à avoir la plus faible température de bruit, à la fois pour le système antennaire et pour le récepteur, ce qui permet une amélioration de la sensibilité.

La température de bruit d'un système antennaire dépend de deux paramètres :

- de la température moyenne de bruit des régions "vues" par le système au travers de son diagramme de rayonnement
- de ses pertes.

Les pertes comprennent non seulement celles de(s) antenne(s) composant le système, mais aussi des câbles de couplage et de raccordement au premier ampli (pour lequel a été définie une température de bruit).

La puissance du bruit généré par l'antenne dépend de la température de bruit des régions pointées par chaque lobe du diagramme de rayonnement et pondérée par le gain de ce lobe. Ceci est le plus difficile à déterminer. Généralement le calcul est fait "à la louche" (tout au moins pour les antennes filaires et dérivées) et pratiquement, on cherche à diminuer au maximum les lobes secondaires qui pointent vers le sol à 288K.

Calcul d'un cas concret

Prenons un exemple concret avec une antenne YAGI ⁽⁵⁾ (cas d'école).

La méthode utilisée ici consiste à associer des résistances aux puissances concernées :

- Puissance perdue par effet joule, déterminant le rendement électrique (puissance totale rayonnée sur puissance fournie).
- Puissance reçue via le sol (lobes secondaires)
- Puissance reçue via l'espace (lobe principal)

Nous avons le droit de faire ceci, car le système est passif et linéaire, les résistances sont dans leurs rapports à l'impédance totale, absolument proportionnelles aux puissances mises en jeu.

Il ne reste plus qu'à déterminer la contribution de chaque résistance au bruit total de l'antenne en fonction de son propre bruit et de son rapport à la résistance totale.
Le système peut être représenté schématiquement sur la figure 2.

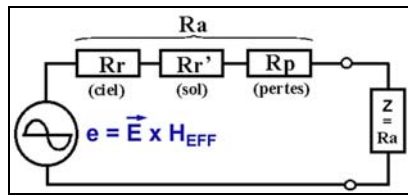


Figure 2 : Sources de bruit dans une antenne

OK, mais comment déterminer les valeurs de chaque résistance ?

- Pour la résistance de pertes, on peut déterminer les pertes des antennes grâce au simulateur en regardant la différence de gain entre une antenne "idéale" et la même en "vrai" métal.
- Pour les pertes dues au coupleur, on peut les calculer en fonction de son architecture. On essaiera d'éviter les câbles en série pour privilégier les câbles en parallèle, avec un minimum de connecteurs.
- Pour la partie de la résistance de rayonnement vers le sol, on pourra faire (s'il est possible) une mesure de gain AV/AR de l'antenne, et/ou utiliser le simulateur en prenant une marge de plusieurs dB sur les valeurs théoriques.

Bien sûr, il faudrait voir ce que tout cela devient avec les désadaptations. Mais nous débordons du cadre de cet article. Se rappeler que ces opérations ne sont pas critiques, nous n'avons pas à calculer un bilan de liaison au centième de dB. Elles peuvent servir à déterminer le paramètre de notre système de réception, sur lequel il faudra faire un effort. Soit donc un système antennaire ($Z_0 = 50 \Omega$) composé de plusieurs antennes YAGI ayant un rendement de 90%. Les pertes totales dans le coupleur sont de 0,5 dB. Le préampli est connecté directement au système. Celui-ci pointe dans une direction du ciel qui présente une température de bruit de 20 K dans son lobe principal. La totalité des lobes secondaires pointant vers le sol représente une puissance inférieure de 16 dB par rapport au lobe principal. Calculer sa température de bruit.

Comme la température de bruit est une valeur linéaire, il suffit de calculer les températures de bruit de toutes les composantes du système antennaire, puis de les additionner pour avoir la température de bruit globale. Noter que les câbles et l'antenne sont physiquement à la température ambiante. Nous obtenons :

1) Pertes dans les câbles.

Une perte de 0,5 dB correspond à la mise en série avec la charge d'une résistance de :

$$50 \Omega \times (10^{0,05} - 1) = 6,1 \Omega, \text{ dont la température de bruit est égale à :}$$

$$288 \times 6,1 / 50 = 35,1 \text{ K.}$$

N-B : C'est la température de bruit correspondant à un fb de 0,5 dB (voir figure 1).

2) Pertes dans l'antenne.

Un rendement de 90% signifie que l'impédance de 50Ω du système est composé d'une résistance de rayonnement de 45Ω en série avec une résistance de perte de 5Ω , dont la température de bruit est égale à :

$$288 \times 5 / 50 = 28,8 \text{ K.}$$

Lobes secondaires :

Une puissance de -16 dB représente un rapport de $10^{1,6} = 39,8$, soit une résistance équivalente à $45 / 39,8 = 1,25 \Omega$, dont la température de bruit est égale à :

$$288 \times 1,25 / 50 = 7,2 \text{ K.}$$

Résistance de rayonnement (température de 20 K) :

La partie de la résistance de rayonnement correspondant au lobe principal dirigé vers l'espace est égale à $45 - 1,25 = 43,75 \Omega$, dont la température de bruit est égale à :
 $20 \times 43,75 / 50 = 17,5 \text{ K}$.

La température de bruit du système antenne est alors égale à :
 $35,1 + 28,8 + 7,2 + 17,5 = 88,6 \text{ K}$.

Maintenant, nous allons déterminer la sensibilité d'un récepteur connecté à notre système antenne, d'abord avec un fb de 1 dB, puis avec un fb de 0,4 dB. La sensibilité sera définie pour un rapport S/B de 3 dB dans une bande de 100 Hz (CW lente).

1) Facteur de bruit de **1 dB**.

La température de bruit correspondante lue sur l'abaque de la figure 1 est de **75 K**.

La température équivalente de bruit total à l'entrée du récepteur est égale à :

$$88,6 + 75 = 163,6 \text{ K}.$$

La puissance équivalente de bruit dans une bande de 100 Hz est égale à :

$$-174 + 10\text{Log}(163,6/288) + 20 = -156,5 \text{ dBm}.$$

La sensibilité est égale à $-156,5 + 3 = -153,5 \text{ dBm}$.

2) Facteur de bruit de **0,4 dB**, soit une température de bruit de **29 K**.

Température équivalente de bruit à l'entrée :

$$88,6 + 29 = 117,6 \text{ K}.$$

Puissance équivalente de bruit dans une bande de 100 Hz :

$$-174\text{dBm} + 20\text{dB} + 10\text{Log}(117,6/288) = -157,9 \text{ dBm}^{(6)}.$$

La sensibilité est maintenant égale à $-157,9 + 3 = -154,9 \text{ dBm}$.

Nous constatons que l'amélioration du facteur de bruit de 1 à 0,4 dB nous a fait gagner 1,4 dB en sensibilité au lieu de 0,6 dB en liaison troposphérique. Et encore, notre système antenne n'est pas très performant, avec des pertes élevées.

En supprimant les pertes dans les câbles (0,5 dB), nous gagnerions 1,5 dB pour un fb de 0,4 dB, soit une sensibilité pour une bande de 100 Hz égale à **-156,4 dBm** (faites le calcul à titre d'exercice). Ce résultat nous montre que si un meilleur rendement du système antenne nous fait gagner 0,5 dB à l'émission, il peut nous faire gagner trois fois plus en réception avec un bon facteur de bruit. Mais ceci, pour une liaison satellite, car pour une liaison troposphérique, le gain de 0,5 dB serait le même à l'émission et à la réception.

On terminera sur le sujet en ajoutant un mot sur le facteur de mérite d'un système de réception. Celui-ci s'exprime par un rapport G/T , soit le gain divisé par la température de bruit du système. C'est le critère déterminant pour la sensibilité, d'autant meilleure que G/T est élevé.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous verrons le calcul du facteur de bruit d'une chaîne de réception.

La Rubrique "Comment ça marche ?" est une activité collective du radio-club F6KRRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes.

- 1) Rappel de la formule permettant de passer de la puissance en watts à la puissance en dBm : $P(\text{dBm}) = 10 \times \text{Log}_{10}[P(\text{mW})]$. Alors si l'on prend pour P la somme de deux puissances $P1 = 1\text{mW}$ (0dBm) et $P2 = 0,25 \text{ mW}$ (-6dBm) (différence 6 dBm) on obtient une puissance totale $P = 10.\text{Log}(1,25) = 0,969 \text{ dBm}$ soit un accroissement de

puissance de ≈ 1 dB. Si P_1 est le signal et P_2 le bruit, le facteur de bruit est de 1 dB. Le prochain "Comment ça marche" contiendra un abaque qui permet d'obtenir ce résultat sans passer par des calculs compliqués.

- 2) On exclue les bruits parasites : atmosphériques et industriels*
- 3) C'est le cas pour le soleil et les étoiles. De même pour le sol, d'autant plus sensible par nuit claire.*
- 4) Enfin... une toute petite partie.*
- 5) Avec les paraboles, le langage est différent et les mots n'ont pas forcément la même signification.*
- 6) La puissance de -174 dBm étant définie pour une bande de 1Hz, pour une bande de 100 Hz, il faut ajouter $20 \text{ dB} = 10 \cdot \text{Log}(100)$.*