

Bruit thermique et réception

R. BERRANGER, F5NB

Ce document est une version remaniée d'un article paru dans la revue Radio-REF de décembre 2003.

Pour comprendre sans problème cet article, il est nécessaire de maîtriser les décibels et les unités exprimées en décibels (dBm par exemple). Il suffit d'avoir lu l'article "Les décibels" publié dans le même numéro de Radio-REF, ou par ailleurs sur ce site.

Toute résistance soumise à une température supérieure à 0°K (zéro absolu) génère un bruit électrique⁽¹⁾. Celui-ci est dû à l'agitation électronique des atomes provoquée par la température et se traduit par l'apparition d'une f.e.m. de bruit aux bornes de la résistance. Ce bruit, dit "bruit thermique" a des propriétés particulières.

Propriétés en amplitude.

L'amplitude crête instantanée obéit à la loi statistique de Gauss. C'est pour cela que le bruit thermique est appelé "bruit gaussien".

Soit un bruit dont la f.e.m. est représentée sur la figure 1.

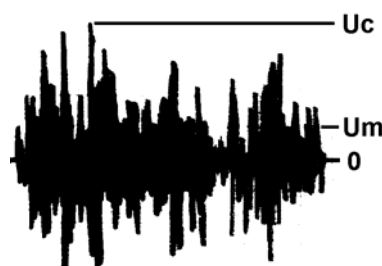


Figure 1.

Soit U_m = tension efficace du bruit (puissance moyenne)

Soit U_c = tension crête instantanée (puissance crête)

Conformément à la loi de Gauss, il existe des pics de tension d'autant plus rares qu'ils sont plus élevés. Si nous prenons 99,9% du temps, le rapport entre la tension crête U_c et la tension efficace U_m est de 13 dB. Ce rapport est appelé "facteur de crête". Pour rappel, un signal sinusoïdal a un facteur de crête de 3 dB.

Propriétés en fréquence.

Si la résistance est parfaitement pure, le bruit s'étend sur une bande de fréquence infinie. Il contient tout le spectre avec une amplitude constante. Ceci est la caractéristique d'un "bruit blanc". Si le bruit est différent, il pourra cependant être assimilé à un bruit blanc dans une bande de fréquence limitée si son comportement est gaussien et son spectre plat à l'intérieur de cette bande.

Propriétés en puissance.

La puissance de bruit générée par une résistance dépend de la température de celle-ci et de la bande passante de mesure. Elle obéit à la loi suivante :

$P = K.T.B$, avec :

- P = puissance de bruit, exprimée en watts, mais convertie en général en dBm
- K = constante de Boltzmann
- T = température exprimée en degrés Kelvin⁽²⁾
- B = bande passante du filtre de mesure (bande carrée) exprimée en Hz

Nous voyons que la puissance de bruit est proportionnelle :

- à la température. Une même résistance à des températures de 30°K et 300°K aura une différence de puissance de bruit de 10, soit 10 dB.
- à la bande passante de la mesure. Si nous mesurons le bruit dans une bande de 1 MHz, il sera 100 fois (+20 dB) plus élevé que dans une bande de 10 kHz.

Pour une température de 300°K (27°C)⁽³⁾ et une bande passante de 1 Hz, nous obtenons une puissance de bruit **$P = -174 \text{ dBm}$** . C'est la **puissance de référence**

Si cette puissance ne dépend pas de la valeur de la résistance, la "tension de bruit" développée aux bornes d'une résistance est fonction de celle-ci. L'ensemble se comporte comme s'il y avait en série avec la résistance un générateur de tension dont la f.e.m. obéirait à la loi :

$$U = \sqrt{4KTBR}$$

Voir sur la figure 2 la représentation schématique du système.

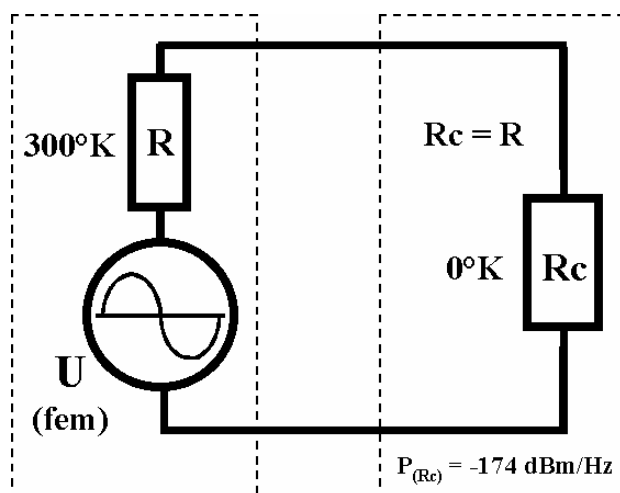


Figure 2

Si $R_c = R$, la puissance de bruit générée par R (à 300°K) et consommée par R_c (à 0°K) est constante et égale à **-174dBm/Hz**.

Mesure du bruit.

Elle ne peut se faire directement avec une résistance de charge à 0°K comme sur la figure 2 pour des raisons évidentes. Par ailleurs, nous devons souvent déterminer des puissances de bruit à des endroits non accessibles pour une mesure directe.

La mesure du bruit se fait en puissance, par comparaison avec une puissance de bruit étalon. Si nous connaissons l'impédance de la source de bruit, nous pouvons également mesurer la tension de bruit et en déduire la puissance de bruit par calcul.

Dans ce cas, la mesure se fait par la comparaison du bruit obtenu avec le bruit théorique que nous devrions avoir, compte tenu des paramètres de température et de bande passante.

Comme la mesure s'effectue généralement à la température ambiante, soit 300°K, il sera très difficile de mesurer ou calculer de faibles puissances de bruit.

Le résultat de cette comparaison détermine le :

Facteur de bruit (fb en abrégé).

Avant de définir le facteur de bruit, nous allons ouvrir une grande parenthèse sur l'addition de puissances.

Avec des puissances exprimées en watts, l'addition est facile : $6 \text{ W} + 0,2 \text{ W} = 6,2 \text{ W}$. Mais avec des puissances exprimées en dBm, l'addition est plus compliquée : $(-174 \text{ dBm}) + (-174 \text{ dBm})$ ne fait pas -348 dBm , mais -171 dBm . En effet, pour effectuer l'addition, il faut d'abord convertir les dBm en watts, les additionner, puis reconvertir la somme en dBm.

Il est alors intéressant de construire un abaque universel pour effectuer l'opération directement, sans conversion. Celui-ci découle du principe suivant :

Pour des valeurs exprimées en logarithmes comme les dBm, un accroissement d'une unité représente un rapport constant, quelle que soit la grandeur de la valeur. Donc, si nous additionnons deux valeurs comme les dBm avec un rapport constant entre elles exprimé en dB, la somme aura aussi un rapport constant avec les valeurs additionnées (écart en dB).

Nous pouvons alors construire un abaque qui permet de calculer simplement la puissance somme en donnant l'accroissement à apporter à la plus élevée des deux puissances que l'on additionne, quand celles ci sont exprimées avec une échelle logarithmique.

Cet abaque se trouve sur la figure 3. Je vous encourage à le photocopier en l'agrandissant, puis de le conserver avec vos autres abaques⁽⁴⁾.

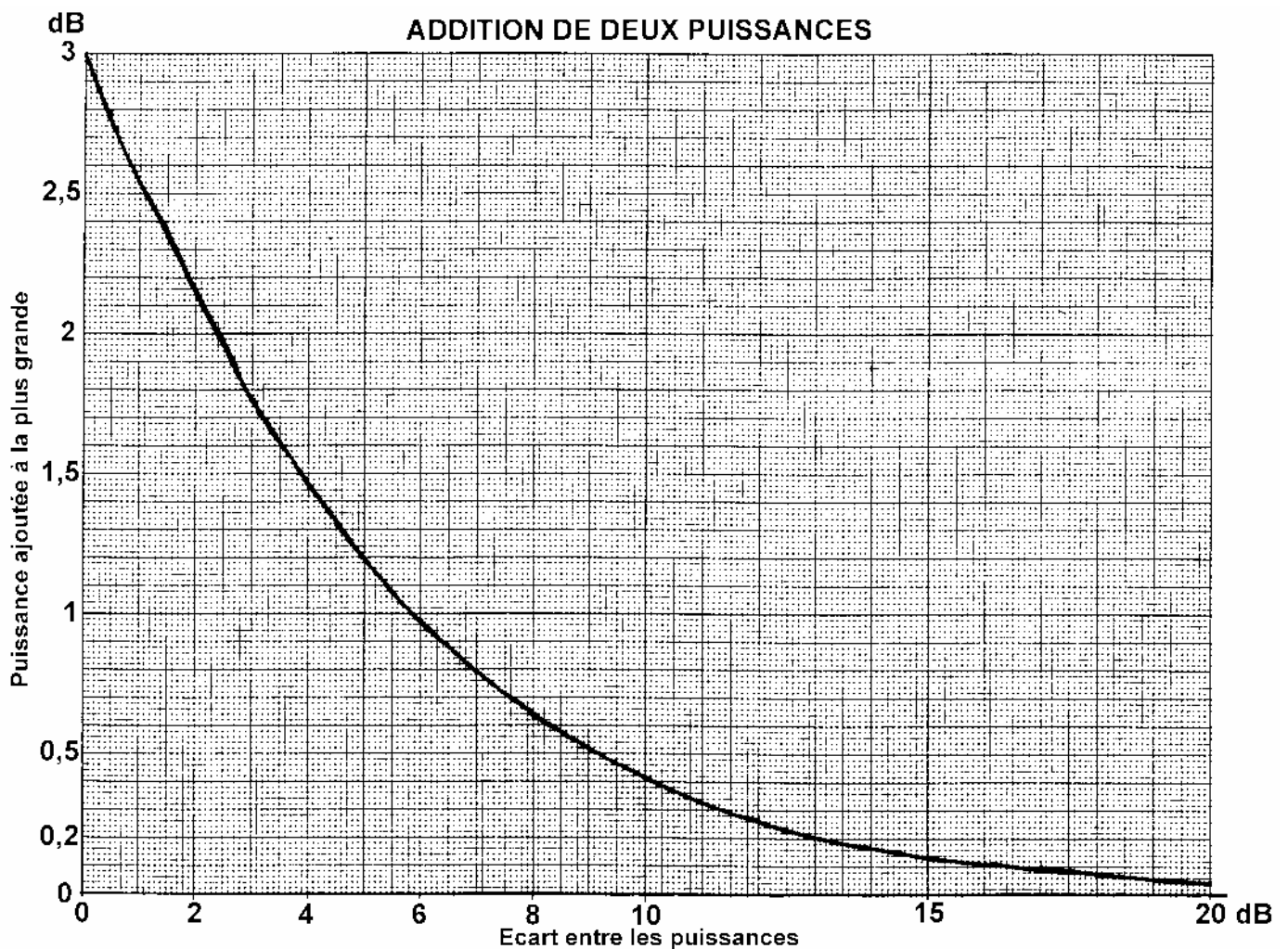


Figure 3

Construction de l'abaque :

Soit x la variable (abscisse) et y le résultat (ordonnée). Nous avons :

$$y = 10 \cdot \log_{10}(1 + 1/10^{x/10})$$

Les valeurs x et y étant exprimées en dB.

Lecture de l'abaque :

En abscisse, nous avons l'écart entre les deux puissances ajoutées exprimé en dB, et en ordonnée, la valeur en dB également à ajouter à la puissance la plus élevée pour obtenir la puissance totale.

1^{er} exemple : Soit à ajouter une puissance de -142 dBm à une puissance de -136 dBm. La différence représente 6 dB. Pour le point d'abscisse 6 dB, l'ordonnée nous donne un accroissement de 0,97 dB (1 dB).

La puissance totale sera donc de $-136 + 1 = -135$ dBm.

2^{ème} exemple : Soit à ajouter une puissance de -3 dBW à une puissance de $+2$ dBW. La différence est de $(+2) - (-3) = 5$ dB. L'accroissement est de 1,19 dB (1,2 dB). La puissance totale sera de $+2 + 1,2 = 3,2$ dBW.

3^{ème} exemple : Soit une puissance de -136 dBm qui subit un accroissement de 1 dB. Quelle est la puissance résultante et quelle est la puissance ajoutée ? Nous avons :

- $P_{(tot)} = -136 + 1 = -135$ dBm
- Delta P lu sur l'abscisse de l'abaque pour une ordonnée de 1 = 5,9 dB (6 dB)
- Puissance ajoutée = $-136 - 6 = -142$ dBm

N-B : *L'abaque est valable tel quel pour l'addition de puissances. Pour l'addition de tensions (dBV, dBμV) il faut multiplier les deux échelles par deux.*

Définition du facteur de bruit

C'est le facteur d'accroissement de la puissance de bruit apporté par un dispositif électronique quand il lui est appliqué un bruit de référence.

Le bruit de référence utilisé est le bruit généré par une résistance idéale à 300°K (27°C). Nous avons vu que celui-ci est de -174 dBm par Hz de bande.

Prenons par exemple un dispositif qui a un facteur de bruit de 3 dB. En lui connectant en entrée une résistance à 300°K , égale à son impédance d'entrée, la puissance de bruit équivalente⁽⁵⁾ sera de -174 dBm + 3 dB = -171 dBm par Hz. **Physiquement, la puissance équivalente de bruit à l'entrée du dispositif sera égale à la puissance de bruit mesurée en sortie, diminuée de son gain en décibels.** Le gain peut être négatif si le dispositif est un atténuateur, un mélangeur passif ou un filtre avec pertes.

Pour un dispositif actif (ampli), le facteur de bruit est indépendant du gain. Pour un dispositif passif, le facteur de bruit est égal à son atténuation.

Examinons la figure 4.

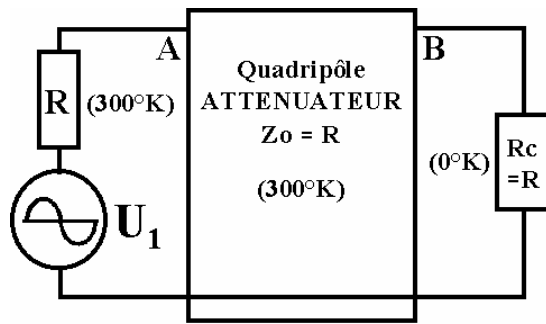


Figure 4

Avec une atténuation nulle (B relié à A), nous obtenons le schéma de la figure 1. On peut dire que la charge R_c "voit" le bruit d'une résistance à 300°K , soit la référence.

Avec une atténuation quelconque, les propriétés du quadripôle sont telles que R_c "voit" en B une impédance image encore égale à R , ayant donc un bruit toujours égal à la référence si l'atténuateur est à 300°K .

Or le signal a été atténué de la valeur de l'atténuateur, donc le rapport signal sur bruit (S/B) a diminué de cette valeur. Ceci équivaut à un facteur de bruit de cette même valeur. Ceci reste vrai tant que la température de l'atténuateur est celle pour laquelle le facteur de bruit a été défini.

Maintenant, connaissant le facteur de bruit d'un dispositif, on peut chercher à connaître la puissance équivalente (ramenée à son entrée) du bruit généré par celui-ci.

Rien de plus simple, utilisons l'abaque de la figure 3. En ordonnée, nous avons le facteur de bruit, et en abscisse, nous lisons la différence de puissance entre la référence et le bruit équivalent. L'opération est décrite dans le 3^{ème} exemple ci-dessus.

Facteur de bruit et sensibilité.

La sensibilité d'un récepteur est définie pour un rapport signal sur bruit (S/B). Si le bruit augmente de 1 dB, la sensibilité diminue de 1 dB⁽⁶⁾. Le facteur de bruit représentant une augmentation du bruit, si le facteur de bruit augmente de 1 dB, la sensibilité diminue de 1 dB également. Ceci, tant que la source est assimilable à une résistance à 300°K , ce qui est le cas pour toutes les transmissions terrestres (avec une petite variation entre les régions équatoriales et polaires qui n'ont pas la même température ambiante).

Donc pour des liaisons terrestres, un facteur de bruit en dessous de 1 dB n'améliore quasiment plus la sensibilité.

Cela vaut pour les liaisons troposphériques en VHF et en UHF. Pour les HF, le bruit cosmique⁽⁷⁾ capté par l'antenne est bien supérieur au bruit thermique, même pour la bande la plus haute des 28-30 MHz. Pour un récepteur HF, un facteur de bruit (fb) de 10 dB est largement suffisant et un fb de 15 dB est encore acceptable compte tenu des autres sources de bruit que sont l'atmosphère (QRN), et l'industrie (QRM).

Question : Alors, à quoi bon se décarcasser pour améliorer le facteur de bruit en dessous de 1 dB, si ça ne sert à rien ?

Réponse : Cela ne sert peut-être à rien pour des liaisons troposphériques, mais pour des liaisons spatiales (avec des satellites), il en va tout autrement.

Mais avant de développer ce sujet, nous allons parler d'une autre manière de mesurer un facteur d'accroissement de bruit.

Température de bruit.

Si nous plongeons une résistance dans l'azote liquide à -180° , nous pouvons dire que la température de bruit de la résistance est de $273 - 180 = 93^{\circ}\text{K}$.

Si maintenant, nous pointons une antenne parfaite (sans pertes), avec une directivité très forte et unique (pas de lobes secondaires), vers une région du ciel sans étoiles (c'est rare), alors nous pouvons dire que la température de bruit de notre antenne est d'environ 3°K (température résiduelle de l'univers)⁽⁸⁾. Bien sûr, ce cas limite est imaginaire.

Température équivalente de bruit.

En examinant notre abaque de la fig. 3, nous voyons que pour des facteurs de bruit inférieurs à 3 dB, la puissance équivalente du bruit généré par le dispositif est inférieure au bruit de référence, en l'occurrence une résistance à 300°K . Par exemple, pour un fb de 1 dB, il est de $-174 - 5,9 = -179,9$ dBm/Hz. et pour un fb de 0,5 db, de $-183,1$ dBm/Hz. Nous avons une différence de 3 dB en puissance de bruit pour une différence de 0,5 dB de facteur de bruit, et cela s'accroît pour les fb plus faibles.

Comme les faibles facteurs de bruit ne sont significatifs que pour les faibles températures de bruit de la source, il est intéressant de remplacer le facteur de bruit par une autre valeur, non plus logarithmique, mais linéaire : la température équivalente de bruit⁽⁹⁾.

La température équivalente de bruit est la température à laquelle il faudrait mettre une résistance de référence pour qu'elle génère la même puissance de bruit que le dispositif. Pour convertir un facteur de bruit en température équivalente de bruit, il suffit de déterminer le rapport entre la puissance de bruit et le bruit de référence à l'aide de l'abaque de la figure 3, puis de convertir ce rapport Log en rapport linéaire, puis de diviser 300°K par ce dernier.

Exemples :

- Pour un fb de 1 dB, le rapport entre les puissances est de 5,9 dB, soit 3,89 en linéaire. La température équivalente de bruit est alors égale à $300 / 3,89 = 77^{\circ}\text{K}$
- Pour un fb de 0,5dB, le rapport entre les puissances est de 9,1 dB, soit 8,13 en linéaire. La température équivalente de bruit est alors égale à $300 / 8,13 = 36,9^{\circ}\text{K}$
- Pour un fb de 3dB, le rapport entre les puissances est de 0 dB, soit 1 en linéaire. La température équivalente de bruit est alors égale à 300°K

Mais il est encore plus simple de construire un abaque pour la conversion directe du facteur de bruit en température de bruit. Celui-ci est représenté sur la figure 5.

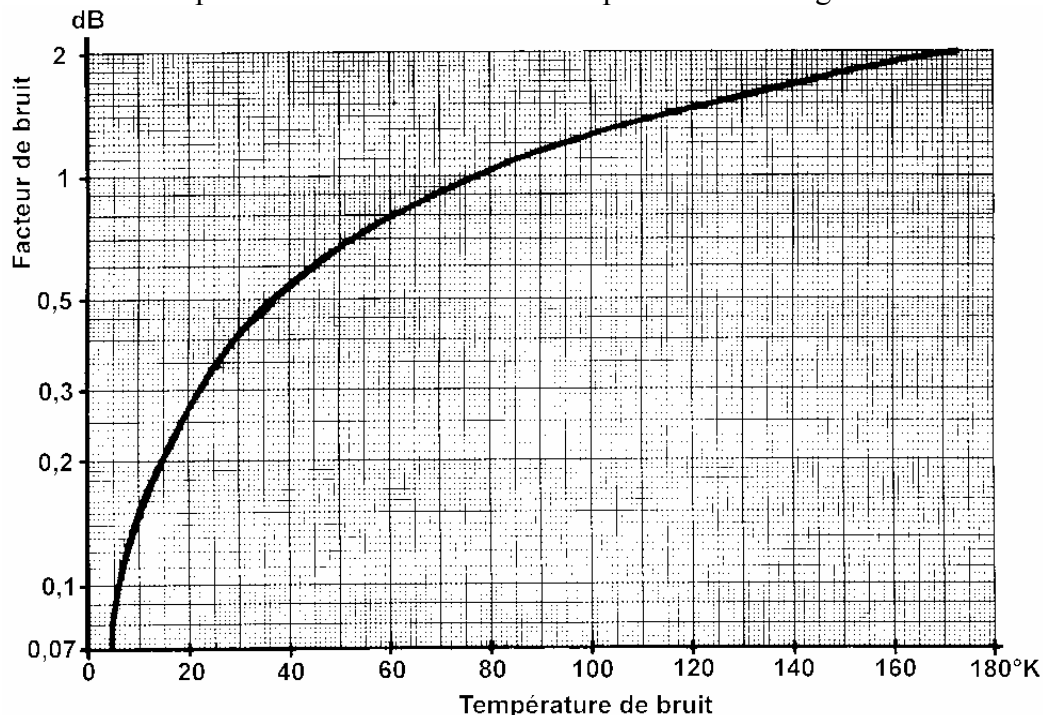


Figure 5

Attention, l'échelle des fb est logarithmique. Nous voyons que la courbe est asymptotique à 0°K (logique). Il est amusant de noter que le "facteur de bruit" de l'univers (parties vides) est de 0,05 dB environ.

Température de bruit d'un système antennaire.

Pour les systèmes antennaires dédiés aux liaisons troposphériques, la température moyenne de bruit est de 300°K et l'on a vu que les faibles facteurs de bruit ne présentaient pas d'intérêt.

Pour des systèmes antennaires pointés vers des satellites, naturel (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 regardent le sol à 300°K.

Prenons un exemple concret avec une antenne YAGI⁽¹⁰⁾ (cas d'école) :

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

- Puissance perdue par effet joule, et déterminant le rendement électrique (puissance totale rayonnée sur puissance fournie).
- Puissance rayonnée vers le sol (lobes secondaires)
- Puissance rayonnée vers 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 6.

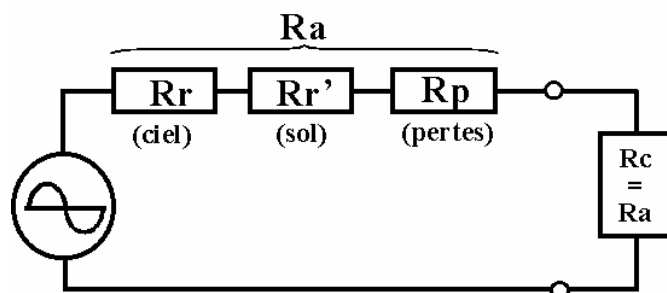


Figure 6

Bien, me direz-vous, 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 AVant/ARrière 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 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.

1) Pertes dans les câbles.

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

$$50\Omega \times (10^{0,05} - 1) = 6,1\Omega$$

dont la température de bruit est de :

$$300 \times \frac{6,1}{50} = 36,6^\circ K$$

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

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 de :

$$300 \times \frac{5}{50} = 30^\circ K$$

3) 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 de :

$$300 \times \frac{1,25}{50} = 7,5^\circ K$$

4) 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 de :

$$20 \times \frac{43,75}{50} = 17,5^\circ K$$

La température de bruit du système antenne est alors égale à :

$$36,6 + 30 + 7,5 + 17,5 = 91,6^\circ K$$

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 5 est de 77°K.

La température équivalente de bruit total à l'entrée du récepteur est égale à $91,6 + 77 = 168,6^\circ K$.

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

$$-174 + 10 \text{Log} \frac{168,6}{300} + 20 = -156,5 \text{dBm}$$

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 : $91,6 + 29 = 120,6^\circ K$

Puissance équivalente de bruit dans une bande de 100 Hz :

$$-174 + 10 \text{Log} \frac{120,6}{300} + 20 = -158 \text{dBm}$$

La sensibilité est maintenant égale à $-158 + 3 = -155 \text{ dBm}$

Nous constatons que l'amélioration du facteur de bruit de 1 à 0,4 dB nous a fait gagner 1,5 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 diminuant les pertes de moitié (0,5 dB au lieu de 1 dB en tout), nous gagnerions 1,4 dB pour un fb de 0,4 dB, soit une sensibilité de $-156,4 \text{ dBm}$ (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 tropo, le gain est le même à l'émission et à la réception.

Pour terminer sur le chapitre, je rajouterai 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 relative de bruit du système. G est le gain et T est le rapport entre la température de bruit et 300°K. C'est le critère déterminant pour la sensibilité, d'autant meilleure que G/T est élevé. Nous voyons donc qu'il y a intérêt à avoir le plus grand gain possible, par exemple en couplant plusieurs antennes, mais quand la température de bruit augmente d'une manière similaire au gain, nous n'améliorons plus la sensibilité. Par contre, le gain apporté par le système antenne, augmentera en émission la puissance équivalente rayonnée (PIRE).

Je ne m'étendrai pas plus sur le sujet qui est bien maîtrisé et décrit par les spécialistes du "Moon-bounce" (liaison par réflexion sur la lune).

Facteur de bruit et chaîne de réception.

Nous partirons d'un exemple type d'un récepteur VHF large bande comprenant les trois composants génériques d'une chaîne de réception : ampli, filtre et mélangeur.

Nous verrons ensuite comment déterminer le facteur de bruit en entrée en fonction de tous les paramètres des composants de la chaîne.

Soit la chaîne de la figure 7.

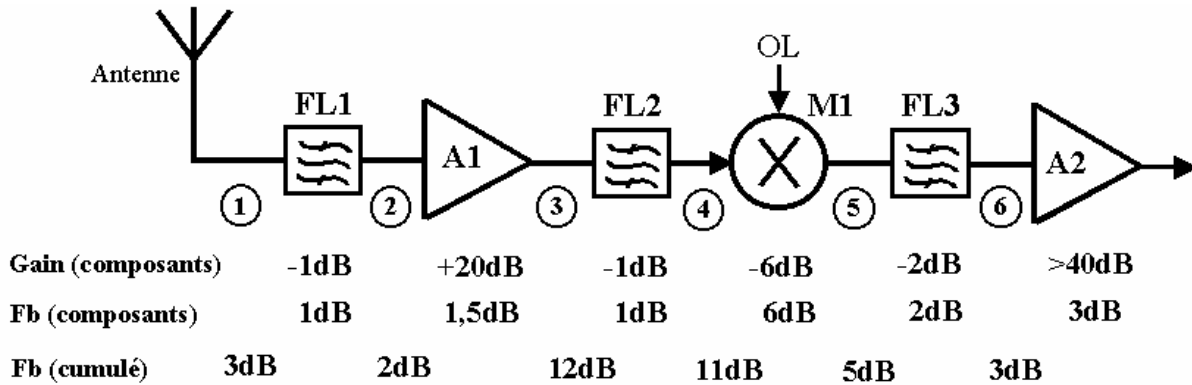


Figure 7

Commentaires :

FL1 est le filtre de bande d'entrée. Il a des pertes de 1 dB. Son facteur de bruit est égal à ses pertes.

A1 est le préampli d'entrée faible bruit (LNA in English).

FL2 est un deuxième filtre d'entrée dont le rôle sera explicité plus loin.

M1 est un mélangeur passif. Son facteur de bruit n'est que légèrement supérieur à ses pertes pour un mélangeur de qualité. Pour simplifier, on prend son bruit égal à ses pertes. Mais attention, il s'agit d'un facteur de bruit SSB. Ici, il faut traduire SSB par "une seule bande de fréquence". En effet, je rappelle succinctement qu'un mélangeur produit une FI pour deux fréquences HF. L'une est celle que nous avons choisie, et l'autre est la fréquence "image" que nous devons filtrer avant le mélangeur, en principe n'importe où dans la chaîne amont. Mais si nous ne la filtrons pas juste devant le mélangeur, alors celui-ci "verra" le bruit généré par l'ampli A1 à la fréquence image et le facteur de bruit du mélangeur sera augmenté de 3 dB. Pour contrer cela, on "coupe" le filtre d'entrée en deux et on en met une partie devant le mélangeur. Ce 2^{ème} filtre peut être simplifié, car nous pouvons voir avec l'abaque de la fig. 3 qu'une atténuation de 10 dB de la fréquence image suffit à diminuer la puissance de bruit de 2,6 dB.

Si nous avons un mélangeur actif, celui-ci aurait un gain et un facteur de bruit comme un ampli, mais avec la même remarque concernant la bande de fréquence image.

FL3 est le filtre de canal

A2 est l'ampli FI. Son gain est suffisant pour "masquer" le facteur de bruit des composants suivants.

Détermination du facteur de bruit en entrée.

Nous avons déjà vu comment on déterminait le bruit équivalent en entrée d'un dispositif en connaissant son gain et le bruit à sa sortie. Nous avons vu également comment on additionnait des puissances en dBm. Pour déterminer le bruit en entrée, il suffit de partir de la sortie et de remonter vers l'entrée en répétant ces opérations sur tous les composants.

En l'occurrence, nous partirons du point 6 où le facteur de bruit est celui de A2, soit 3 dB, non dégradé par les composants suivants, grâce au gain élevé de l'ampli.

Au point 5, le fb est augmenté des pertes de FL3, soit $3 + 2 = 5$ dB

Au point 4, le fb est augmenté des pertes (SSB) de M1, soit $5 + 6 = 11$ dB

Au point 3, le fb est augmenté des pertes de FL2, soit $11 + 1 = 12$ dB

Au point 2, le fb "ramené" par la chaîne est égal à $12 - 20 = -8$ dB⁽¹¹⁾. Celui-ci est plus faible que celui de A1 de $1,5 - (-8) = 9,5$ dB. Maintenant utilisons l'abaque de la figure 3, et nous voyons que pour deux puissances différentes de 9,5 dB, l'augmentation est de 0,46 dB. Le facteur de bruit au point 2 sera donc égal à $1,5 + 0,46 = 1,96$ dB (2 dB).

Au point 1, le fb est augmenté des pertes de FL1 et est égal à $2 + 1 = 3$ dB.

Si nous connectons une antenne avec un câble qui a des pertes, le facteur de bruit sera augmenté de ces pertes. C'est pourquoi, pour nous les radioamateurs qui n'avons pas de problème de brouillage, nous avons intérêt à mettre un LNA d'une quinzaine de dB de gain à la sortie de l'antenne pour "masquer" les pertes du câble et du filtre d'entrée.

Exercice : Rajouter à la chaîne ci-dessus un câble de 2 dB de pertes et dans l'antenne un préampli de 15dB de gain avec un fb de 1,2 dB.

Question : Quel est le nouveau fb présenté à l'antenne ?

Réponse dans la note (12).

Conclusions (provisoires)

J'ai essayé de faire comprendre simplement les effets du bruit thermique dans la réception de signaux radioélectriques, sans nous encombrer de formules ésotériques qui généralement embrouillent le lecteur. Les matheux et les puristes me pardonneront. Dans un prochain article, consacré aux dynamiques dans les récepteurs, je parlerai des effets du bruit thermique, mais aussi des bruits générés par les oscillateurs locaux.

F5NB.

Notes :

- (1) Il s'agit ici d'une résistance idéale, comme la résistance de rayonnement d'une antenne. Dans la pratique, suivant la technologie, les résistances créent plus ou moins de bruit supplémentaire quand elles sont parcourues par un courant. Mais ceci est une autre histoire.
- (2) En toute rigueur, la température "absolue" s'exprime en Kelvin. Mais, comme beaucoup de mes confrères, je préfère l'exprimer en °K, pour éviter toute ambiguïté au "K".
- (3) Personnellement, j'ai toujours pris 300°K (27°C) pour référence, comme la plupart des simulateurs de circuits HF. Pour les gens qui grignotent les dixièmes de dB sur les fb, il semble que 290°K (17°C) soit plus approprié. Cela change peu les fb, et avec le temps et le réchauffement de la Planète, je finirai bien par avoir raison (Hi...)
- (4) En se constituant une bibliothèque judicieuse d'abaques, on peut se passer presque entièrement des formules compliquées que l'on ne retient jamais.
- (5) Il s'agit bien d'une puissance "équivalente", car par exemple, un ampli ne génère pas de bruit à son entrée, mais à sa sortie.
- (6) La sensibilité diminue quand la valeur de sa mesure augmente (subtilités de la langue française).

- (7) *Le bruit cosmique est généré par les étoiles de l'univers. Sa puissance diminue quand la fréquence augmente (6dB par octave). Celui que nous recevons sur terre provenant essentiellement de notre galaxie, le bruit cosmique est aussi appelé "bruit galactique". La puissance du bruit cosmique est également fonction de la région "regardée" dans l'univers. Il augmente dans la direction de la voie lactée et naturellement il est maximum quand nous pointons vers notre étoile la plus proche qui est le soleil.*
- (8) *La température de bruit du ciel est une autre façon de mesurer le bruit cosmique. Le ciel est d'autant plus "froid" qu'il y a moins d'étoiles dans le champ de l'antenne et que la fréquence de travail est élevée.*
- (9) *Equivalente, car valeur mathématique et non réelle. Mais ce terme est souvent sous-entendu et il est courant de lire "température de bruit d'un ampli".*
- (10) *Avec les paraboles, le langage est différent et les mots n'ont pas forcément la même signification.*
- (11) *Procédé de calcul, car évidemment, un "vrai" facteur de bruit n'est jamais négatif.*
- (12) *Nouveau facteur de bruit = 1,5 dB.*