

## Mesurer et optimiser le facteur de mérite de votre station terrienne

Nous allons ici décrire une méthode d'investigation des performances d'une station terrienne par le biais d'une expérience simple utilisant le soleil. C'est aussi une excellente initiation à la radioastronomie.

Dans le domaine spatial, le facteur de mérite ou encore le G/T est le critère primordial qui permet de mesurer les performances d'une station. Plus le G/T est élevé meilleure est la station. Définissons G et T:

- G est le gain de l'antenne
- T est la température de bruit de tout le système ramené en entrée antenne

Concrètement T est la température à laquelle il faudrait porter la résistance de rayonnement de l'antenne pour qu'elle produise le même bruit en sortie de la chaîne de réception (convertisseur, transceiver) en supposant que ladite chaîne soit parfaite c'est-à-dire n'ajoute aucun bruit. Cette température est donc l'addition des contributions de chaque composant de la chaîne en bruit ramené en un seul point : la sortie de l'antenne. Elle inclue aussi l'apport en bruit propre de l'antenne c'est-à-dire le bruit qu'elle capte naturellement de l'univers lorsqu'elle pointe vers le ciel et le bruit terrestre.

Les lignes qui suivent sont l'explication des formules encadrées. Il est possible de passer directement à l'application pratique.

### Explication

Soit  $T_{sys}$  la température de bruit du système ramené à l'antenne.

Si on pointe l'antenne vers le soleil :  $T_{sys1} = T_a + T_r + T_{soleil}$

Si on pointe l'antenne vers le ciel froid :  $T_{sys2} = T_a + T_r + T_{ciel}$

Avec :

$T_a$  = température de l'antenne qui prend compte de ses imperfections (bruit de sol, pertes)

$T_r$  = température ramenée à l'antenne du récepteur (LNA, pertes dans coax)

$T_{soleil}$  = apport en température du soleil

$T_{ciel}$  = apport en température du ciel froid

Dans le G/T on a  $T = T_a + T_r + T_{ciel} = T_{sys2}$  car nous considérons que lors d'une liaison l'antenne pointe vers une zone froide du ciel.

Le rapport de puissance en sortie du récepteur est :

$$P_{out1}/P_{out2} = T_{sys1}/T_{sys2} \quad (\text{car } P = KT) \quad (1)$$

$$T_{soleil} = \text{Flux solaire (W/m}^2) / 2 * A = F_{soleil} \cdot (\lambda^2 / 8\pi) \cdot G \quad (2)$$

avec G = gain antenne et A la surface de captation de l'antenne

Le flux solaire représente l'énergie dans s les polarisations. Comme une antenne ne capte qu'une seule polarisation il faut diviser par 2 le flux.

En effet on peut voir le flux solaire comme la somme de deux polarisations croisées décorréélées ou de deux polarisations circulaires droites et gauches décorréélées. Dans les deux cas l'antenne reçoit soit une seule polarisation rectiligne soit une polarisation circulaire

mais dans un seul sens. Attention, une antenne yagi croisée est en faite à polarisation circulaire comme l'est une hélice.

D'après (1) nous avons :

$$P_{out1}/P_{out2}=Y=(T-T_{ciel}+T_{soleil})/(T)$$

$K T$  = densité spectrale de puissance recueillie =  $A.F$  avec  $A$  = surface équivalente de capture de l'antenne et  $F$ =flux en  $W/m^2/Hz$

D'après (1) et (2) nous avons donc :

$$T=(T_{soleil}-T_{ciel})/(Y-1) = G \cdot \lambda^2/8\pi \cdot (F_{soleil}-F_{ciel})/K(Y-1)$$

$$\text{Donc } G/T=(Y-1).K/[(\lambda^2/8\pi).(F_{soleil}-F_{ciel})]$$

$$\mathbf{G/T = (Y-1).Cste(f)}$$

$$\mathbf{Y = P_{out1} / P_{out2} = P_{chaud} / P_{froid}}$$

**$P_{chaud}$  = puissance de bruit en réception en pointant le soleil**

**$P_{froid}$  = puissance de bruit en réception en pointant le ciel froid**

Comme  $F_{soleil} \gg F_{ciel}$  :

$$Cste(f)=8.\pi.K / [\lambda^2 \cdot F_{soleil}]$$

$\lambda$ = longueur d'onde

Les flux du soleil dépend de la fréquence et dépend de l'activité solaire.

Par exemple :  $F_{soleil}$ = 200 sfu à 2400MHz au 23/04/2002

$$1 \text{ sfu} = 10^4 \text{ Jansky} ; 1 \text{ Jansky} = 10e-26 \text{ W/m}^2/\text{Hz}$$

$K$ =constante de Boltzman= $1.38^e-23 \text{ W/Hz/K}$

Donc:

$$\mathbf{Cste(f)=3.467/(l^2 \cdot F_{soleil} \text{ (sfu)})}$$

**Avec  $l$  la longueur d'onde en m et le flux solaire en unité sfu à la longueur d'onde  $l$**

En général le  $G/T$  s'exprime en dB :

$$\mathbf{G/T_{dB}=10\log_{10}(G/T)}$$

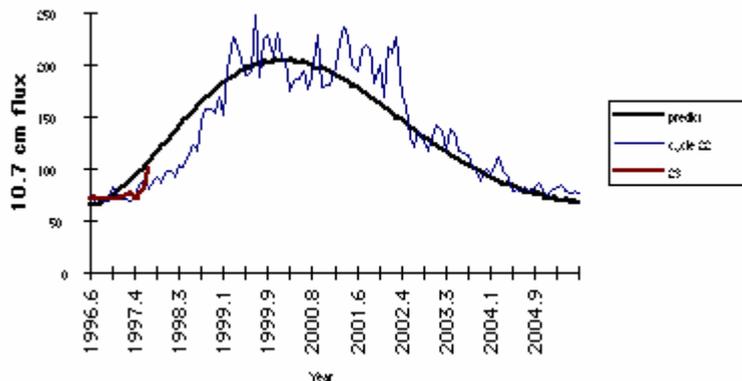
### Exemple

A 2400 MHz :  $\lambda$ = 0.13 m

Si  $F_{soleil}$ =200 sfu alors :  $Cste(2400MHz) = 1.02$

Le flux solaire est donné à la longueur d'onde de 10.7 cm donc très proche de 13 cm. On le retrouve dans les prédictions par « flux 10.7 cm » et est délivré entre autres par le radiotélescope de Ottawa. Le minimum se situe vers 70 sfu et le maximum vers 300 sfu soit un rapport 4.

La courbe suivante montre la variation du flux solaire le long du cycle 22.



Bien entendu il faut connaître le sfu du jour de la mesure.

## ESSAI CHEZ F4BUC

Afin de valider la possibilité d'une telle mesure, j'ai réalisé la procédure avec le matériel suivant (station AO-40 F4BUC) :

- Parabole offset de 85cm de diamètre avec source hélice
- Convertisseur DEM : 0.7 dB de facteur de bruit.
- FT290R

En sortie du FT290R j'ai mesuré le niveau RMS audio en connectant une résistance de 100 Ohms sur la sortie HP et en branchant le voltmètre (position AC) calibré sur 100mV. Le FT290R est en mode CW pour garantir une parfaite linéarité entre le niveau de bruit RF et BF (pas de CAG).

En balayant lentement le ciel en direction du soleil on peut noter à l'oreille une légère augmentation du souffle lorsque l'antenne est pointée sur le soleil. La détection est plus précise au voltmètre avec lequel on peut vraiment pointer précisément au max de souffle. J'ai mesuré la valeur 42mV. En dépointant l'antenne nous retrouvons le ciel froid soit un minimum de souffle. Le minimum lu sur mon voltmètre est alors de 26mV. En pointant le QRA le niveau de bruit monte à 50 mV (je capte tout le QRM maison i.e. ordinateurs etc...)

Il faut tout de même prendre des précautions pour pouvoir effectuer cette mesure au voltmètre. Il faut d'abord s'assurer que votre récepteur fonctionne en régime linéaire (mode cw) et que votre ampli audio n'est pas saturé. Ensuite il faut s'assurer que l'on ne reçoit que du souffle et non des parasites (venant de matériel domestique par exemple). Enfin il faut que la lecture de la tension soit stable. Le mieux est de posséder un atténuateur de 6dB et de mesurer le rapport de tension lorsque l'on insère cet atténuateur entre le récepteur et la sortie du convertisseur. On doit lire une tension moitié avec l'atténuateur. Si c'est le cas votre mesure est bonne, sinon essayez de modifier le volume audio pour obtenir le rapport deux précisément. Si ça ne marche toujours pas, votre convertisseur manque peut être de gain et dans ce cas ajouter un ampli en sortie du convertisseur et réessayez.

Il est bon de faire plusieurs mesures, de calculer les rapports et d'en faire la moyenne. Ainsi vous limiterez les erreurs et votre résultat sera plus proche de la réalité.

Pour ceux qui possèdent un atténuateur variable au pas de 0.5 dB la mesure est beaucoup plus simple car il suffit de le régler à 0dB en pointant le ciel froid et en notant la tension au voltmètre puis de pointer le soleil et d'incrémenter l'atténuateur pour retrouver la même tension. Si la valeur de l'atténuateur est A en dB alors :  $Y=10^{A/10}$ .

Ainsi chez F4BUC:

$P_{out1}/P_{out2} = Y = (42/26)^2 = 2.609$  soit  $10\log_{10}(Y) = 4$  dB de bruit solaire.

L'essai a été fait le Dimanche 19 Mai 2002 et le flux solaire 10.7cm donné par le radiotélescope de Ottawa était de 161 sfu ce jour-là.

Donc :  $C_{ste}(f) = 3.467 / ((0.13)^2 \cdot 161) = 1.274$

Donc :  $G/T = 1.274 \cdot (2.609 - 1) = 2.05$  soit  $G/T_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(2.05) = 3.1$  dB

Cette valeur de G/T permet de copier la balise 13cm de AO-40 avec un rapport signal sur bruit de 26dB lorsque la distance au satellite est de 59000 Km soit à l'apogée.

Avec un G/T de 0dB par exemple soit 3dB de moins, le rapport signal sur bruit serait de  $26 - 3 = 23$  dB.

Ces valeurs sont confortables pour le décodage de la télémétrie et le trafic, ce qui prouve qu'avec un équipement très simple et modeste il est possible de décoder les informations transmises par la balise de AO-40.

La valeur de votre G/T étant mesurée, il reste à en tirer toutes les informations qui s'y trouvent cachées...

## Exploitation du résultat

### *Juger la performance de l'antenne*

Cette mesure du G/T permet de déduire par exemple la performance de l'antenne si l'on connaît précisément le NF du convertisseur.

Soit une parabole offset de 85cm de diamètre : elle fait 24dBi de gain avec 65% de rendement (source hélice) . 24dBi ramené en linéaire fait 215.

Donc connaissant le G/T il est possible de connaître T soit ici  $T = 215 / 2.05 = 105$  K (degrés Kelvin).

0.7dB de NF ou 1.17 en linéaire : la contribution du convertisseur est donc de  $T = T_0 \cdot (F - 1) = 290 \cdot 0.17 = 49$  K

On en déduit la température de l'antenne :  $105 - 49 = 56$  K

L'antenne apporte donc autant de bruit que le convertisseur. A méditer....

Sachant que la température du ciel est de l'ordre de 8 K à 2.4 GHz on en déduit que l'antenne apporte :  $56 - 8 = 48$  K de bruit, soit tout de même 6 fois plus que le ciel froid!

Si l'antenne était parfaite, sa température serait celle du ciel soit 8K et elle produirait 6 fois moins de puissance de bruit. Mais alors ce serait le convertisseur qui aurait la plus grande contribution en bruit. A méditer ...

Dans ces 48K, il faut intégrer les pertes ohmiques de l'antenne et le spill over c'est-à-dire la captation du bruit thermique venant de l'environnement terrestre.

Une façon quantitative de comparer ou optimiser une antenne pour le spatial est de comparer cet apport en bruit.

On comprend mieux l'importance du spill over. Il est difficile à réduire avec des antennes de type offset. Les antennes cassegrains ou cornets sont beaucoup plus performantes.

### *Comparer*

Le vrai critère de comparaison est le G/T car ce paramètre intervient directement dans les calculs de bilan de liaison. Comme c'est un rapport, nous voyons que le gain de l'antenne

rentre autant en compte que la performance en bruit. Rien ne sert de posséder le meilleur convertisseur si l'antenne possède très peu de gain et inversement. Il ne faut donc pas croire que l'on peut "sauver" les performances d'une stations possédant une antenne médiocre en utilisant un convertisseur à très faible bruit.

Deux stations de réception satellite ou EME ou bien de radioastronomie pourront se comparer sérieusement si chacune fait la mesure de son G/T. Celui qui a 3dB de plus sur son G/T sera capable de recevoir des signaux deux fois plus faibles !

### Les limitations dans le trafic satellite

Dans le cas du trafic satellite, le signal que l'on cherche à recevoir est un signal sortant d'un transpondeur. Ainsi le satellite amplifie à son bord le signal utile mais aussi le plancher de bruit qu'il reçoit. Le satellite est donc lui-même une source de bruit.

Si le G/T de la station terrienne devient trop important alors le bruit du transpondeur reçu par l'antenne devient la source de bruit dominante. Le rapport signal à bruit en réception ne s'améliorera plus, il restera égal au rapport signal à bruit en sortie du transpondeur du satellite. Dans ce cas la station est surdimensionnée.

Si le plancher de bruit de votre station pointant le ciel froid est égal au bruit du transpondeur capté par l'antenne, alors votre station est optimale.

Pour le cas de AO-40 en bande S, le rapport signal à bruit maximal en sortie du transpondeur à bord pour la balise est de l'ordre de 28dB. Les QSO phonie les plus puissants étant à 10dB en dessous de la balise, le rapport signal à bruit max est de 18dB. Ce sont les valeurs limites qu'il ne sera jamais possible d'améliorer.

Les calculs de bilan de liaison donnent un G/T optimal de 3.8 dB.

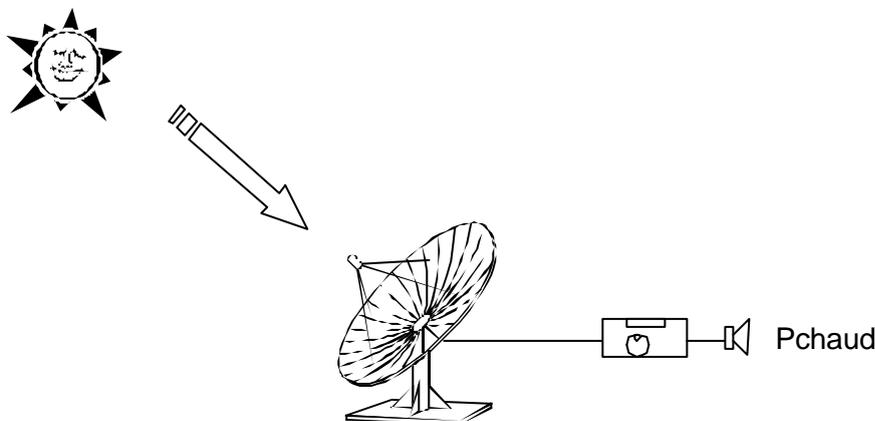
Si nous considérons un facteur de bruit de 1dB pour le convertisseur, et une température de bruit de 40K pour l'antenne alors un tel G/T impliquerait un gain d'antenne de 25dBi (polar circulaire) soit une parabole offset de moins de 1m correctement illuminée.

Ceci correspond à une station AO40 tout à fait classique. Il y a donc de grande chance que vous soyez optimal!

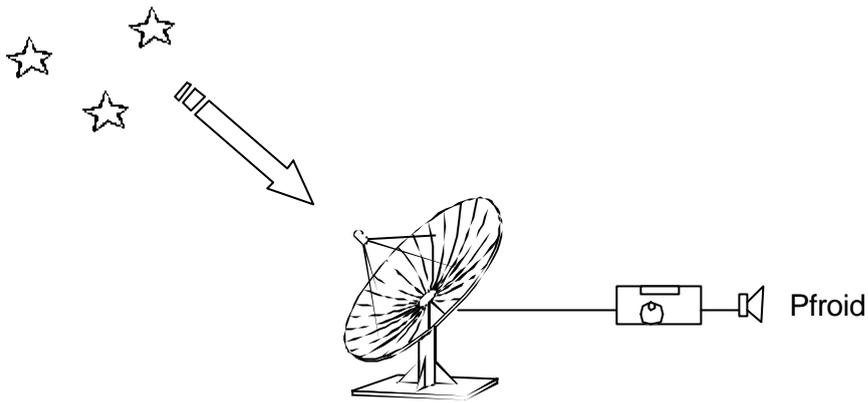
Bien entendu pour les stations EME et de radioastronomie, c'est une autre histoire!

J'espère avoir décrit ici un outil d'investigation supplémentaire aux concepteurs de stations satellites, EME ou de radioastronomie.

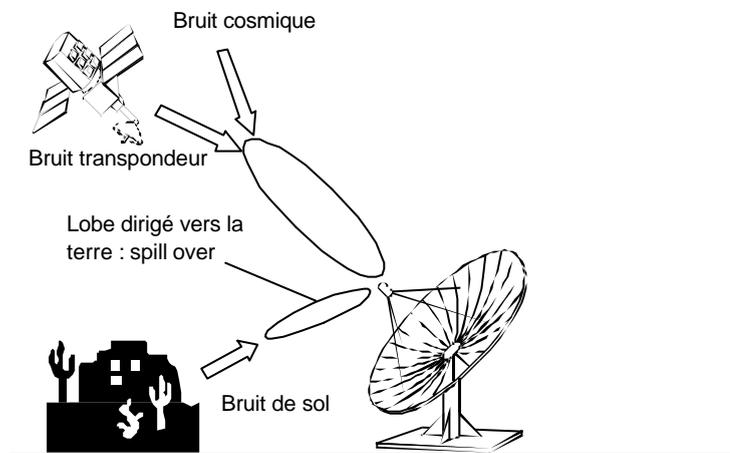
Matthieu CABELLIC  
F4BUC  
F4buc@radioamateur.org



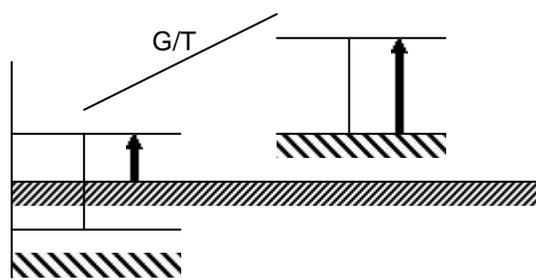
Pointage de l'antenne vers la source chaude : le soleil.



*Pointage de l'antenne vers la source froide : le ciel profond*



*Contributions en bruit sur l'antenne (station satellite)*



Station sous-optimisée

Station sur-optimisée



Plancher de bruit de la station



Plancher de bruit du transpondeur du Satellite



Rapport signal à bruit effectif en réception

Rapport signal à bruit en sortie du satellite

*La question de l'optimisation d'une station*