

## 6. Calcul du bilan de transmission en espace libre

Par François, HB9BLF

Une équation simple permet de calculer la puissance reçue en fonction de la puissance émise, de la distance, de la fréquence utilisée et du gain des antennes RX et TX.

Cet article commence avec un rappel théorique concernant le décibel. Puis l'équation calculant le bilan de transmission en espace libre est décrite. Enfin un exemple est donné avec comparaison du niveau reçu en réception par rapport au bruit thermique. La dynamique nécessaire pour un transceiver travaillant sur un point haut lors d'un contest 2m est calculée en fonction de la distance par rapport aux autres stations.

### Décibel (dB) et dBm

Le **décibel** est l'unité de mesure d'un rapport de puissance. On exprime le gain d'un ampli ou d'un atténuateur en décibels à l'aide de la formule :

$$G[dB] = 10 * \log\left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}\right) \text{ (Voir le dessin ci-dessous)}$$



Le tableau ci-dessous donne quelques exemples.

Rapport $\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$	G[dB]
1	0dB
2	+3dB
4	+6dB
5	+7dB
10 = 10 <sup>1</sup>	+10dB
20	+13dB
40	+16dB
50	+17dB
100 = 10 <sup>2</sup>	+20dB
1000 = 10 <sup>3</sup>	+30dB
10000 = 10 <sup>4</sup>	+40dB

Rapport $\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$	G[dB]
1	0dB
0,5 = 1/2	-3dB
0,25 = 1/4	-6dB
0,20 = 1/5	-7dB
0,1 = 1/10 = 10 <sup>-1</sup>	-10dB
0,05 = 1/20	-13dB
0,025 = 1/40	-16dB
0,020 = 1/50	-17dB
1/100 = 10 <sup>-2</sup>	-20dB
1/1000 = 10 <sup>-3</sup>	-30dB
1/10000 = 10 <sup>-4</sup>	-40dB

Lorsque vous cascadez des amplis et des atténuateurs, les rapports de puissance se multiplient, mais les décibels s'ajoutent.

Exemple : Amplificateur de gain 20dB (x100), suivi d'une atténuation par câble coax ayant 3dB de pertes (x1/2) : gain total G = 100 x 1/2 = 50 ou G[dB] = +20 - 3 = +17dB

Le **dBm** est une unité de puissance relative à 1 milliwatt.

$$P = 1mW \text{ correspond à } P[dBm] = 0dBm$$

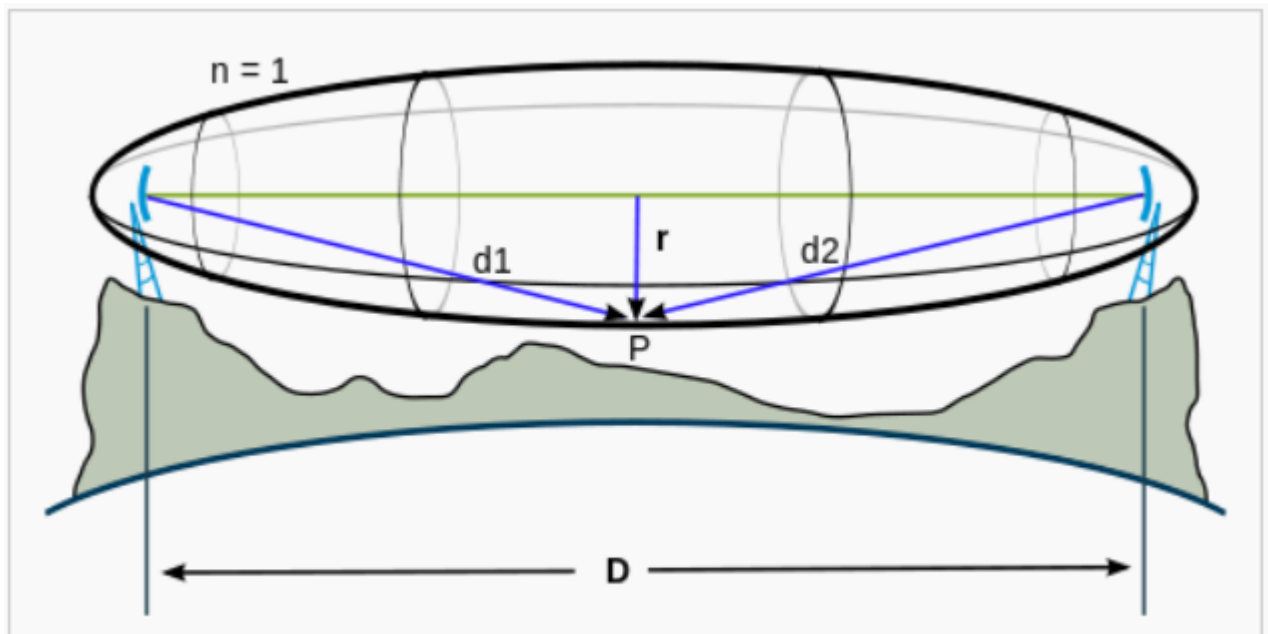
Puissance	P [dBm]
1mW	0dBm
10mW	+10dBm
100mW	+20dBm
1W	+30dBm
10W	+40dBm
100W	+50dBm
1KW	+60dBm

Puissance	P [dBm]
1 milliwatt (1mW)	0dBm
1 microwatt (1µW)	-30dBm
1 nano watt (1nW)	-60dBm
1 pico watt (1pW)	-90dBm
1 femto watt (1fW)	-120dBm
1 atto watt (1aW)	-150dBm

Nous allons utiliser ces définitions dans l'équation qui va suivre.

### Propagation en espace libre

La condition « espace libre » est rarement réalisée entre 2 stations amateurs basées sur terre. Il faut pour cela que la zone de Fresnel entre les 2 antennes soit entièrement dégagée. Ce que l'on appelle zone de Fresnel a la forme d'un ellipsoïde qui relie les antennes d'émission et de réception. Le diamètre de cet ellipsoïde est proportionnel à la racine de la distance entre les 2 antennes et à la racine carrée de la longueur d'onde.



Zone de Fresnel : d est la distance entre l'émetteur et le récepteur, r est le rayon de la zone de Fresnel.

Si D est la distance entre les antennes, le rayon au centre de l'ellipsoïde de Fresnel vaut :

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{D * \lambda}$$

L'ellipsoïde représente la partie de l'espace suffisante à la propagation en espace libre entre les 2 antennes. Pour une distance D = 60Km et  $\lambda = 2m$  (f=144MHz),  $r = 173m$

Si la zone de Fresnel affleure le sol, il n'y a pas d'atténuation supplémentaire du signal par rapport à l'espace libre. Si un obstacle obstrue la moitié inférieure de l'ellipsoïde (arrive à fleur de la droite qui relie les 2 antennes), il faut compter avec une atténuation supplémentaire de 6dB. S'il arrive juste à la hauteur maximale de l'ellipsoïde, l'atténuation supplémentaire est de 14dB environ. L'atténuation augmente encore en fonction de l'épaisseur de l'obstacle. (Source = Wikipedia)

La condition « espace libre » se réalise parfois entre 2 stations opérant sur des points hauts bien dégagés lors de contests VHF par exemple. Cette situation conduit souvent à des grincements de dents à cause de récepteurs saturés par la puissance reçue de la station voisine ou brouillés par un émetteur voisin de mauvaise qualité...

La puissance du signal reçu à l'entrée d'un récepteur en conditions « espace libre » vaut :

$$P_{RX} = P_{TX} * G_{ANT}(TX) * G_{ANT}(RX) * \left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 \quad (1)$$

$P_{RX}$  : Puissance reçue

$P_{TX}$  : Puissance envoyée par l'émetteur moins les pertes dans le câble jusqu'à l'antenne

$G_{ANT}(TX)$  : Gain de l'antenne d'émission, en dBi (dBi = relatif à une antenne dite isotrope)

$G_{ANT}(RX)$  : Gain de l'antenne de réception [dBi] (Note : un dipôle a un gain max valant 2,15dBi)

$\lambda$  : longueur d'onde

$D$  : distance entre les antennes TX et RX

Le plus simple est de tout convertir en décibels. Le calcul se résume alors à des additions / soustractions. Nous avons alors :

$$P_{RX}[dBm] = P_{TX}[dBm] + G_{ANT}(TX)[dB] + G_{ANT}(RX)[dB] + 10 * \log\left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 \quad (2)$$

La puissance reçue est proportionnelle à la puissance émise, aux gains des antennes TX et RX et inversement proportionnelle au carré de la distance entre les 2 stations.

Le terme  $\lambda$  (longueur d'onde) est plus difficile à comprendre (moins intuitif). Il peut être expliqué de la façon suivante : L'antenne de base en radio est l'antenne dipôle demi-onde. La dimension d'une antenne dipôle est  $\lambda/2$ . La surface de captation d'une antenne dipôle est alors de façon logique proportionnelle au carré de la longueur d'onde  $\lambda$ . D'où le terme en  $\lambda^2$  dans l'équation. Le terme  $4\pi$  au dénominateur est lié à la surface d'une sphère de rayon  $D$  (distance) centrée sur l'antenne d'émission, cette surface vaut :  $S = 4\pi D^2$

### Exemple de calcul sur la bande 144MHz

Puissance TX : 1kW (station de contest) → +60dBm

Il faut soustraire la perte du câble coax jusqu'à l'antenne : -2dB →

Puissance envoyée sur l'antenne TX :  $P_{TX} = +58dBm$

Gain de l'antenne d'émission.

On prend ici un système de 2 antennes 13EL LFA de 8m de boom :  $G_{ANT}(TX) = +18.5dBi$

Gain de l'antenne de réception.

Pour simplifier, le même système d'antennes de l'autre côté :  $G_{ANT}(RX) = +18.5dBi$

On ne compte pas de pertes dans le câble depuis l'antenne de réception, car la bonne pratique est de mettre le préampli de réception en tête de mât près des antennes (on ne va pas pinailler pour entre 0,5 et 1dB...)

$$\text{Longueur d'onde : } \lambda = c/f = \frac{300*10^6}{144*10^6} = 2m$$

Distance TX – RX: 60km ( $D = 60000m$ )

Calcul du dernier terme de l'équation (2) qui tient compte de la distance entre les 2 stations et de la longueur d'onde :  $10 * \log\left(\frac{\lambda}{4\pi D}\right)^2 = -111dB$

La puissance reçue par le préampli de réception vaut :

$$P_{RX}[dBm] = +58dBm + 18.5dB + 18.5dB - 111dB = -16dBm \text{ (Environ 25 microwatt).}$$

C'est un signal fort, violent même. Il n'y a pas beaucoup de récepteurs qui sont capables « d'encaisser » cela...

Niveau de bruit à l'entrée du récepteur

Il serait maintenant intéressant de comparer l'amplitude de signal reçu au bruit propre du système de réception.

Le bruit total à l'entrée du système de réception est la somme du bruit généré par le préampli RX et du bruit de fond capté par l'antenne ; ce dernier est envoyé par le sol et par l'espace. Sur 144MHz, l'antenne captera surtout le bruit du sol, qui est soumis à l'agitation thermique normale.

Il existe des formules compliquées et peut intuitives, faisant intervenir le fameux « facteur de bruit » exprimé en dB. Il est plus simple d'utiliser la notion de température de bruit, qui est liée directement à la puissance du bruit, et peut aussi être exprimée en [dBm].

La température de bruit est définie par rapport au 0°K absolu, température théorique à laquelle l'agitation thermique des molécules est nulle. Le 0°K absolu correspond à -273°C (0°C étant la température à laquelle l'eau se change en glace).  $T[°K] = T_{AMB}[°C] + 273$ . Une température ambiante de 27°C correspond à une température absolue (thermodynamique) de :  $T=300°K$ .

Sur 144MHz, la température de bruit d'une antenne avec 0° d'élévation est autour de  $T_{ANT} \approx 1000°K$ . Un préampli de réception a un bruit nettement plus faible, avec normalement sur 144MHz une température de bruit ramenée à l'entrée du préampli valant  $T_{IN}(Preamp) \leq 100°K$ . On obtient alors à l'entrée du préampli de réception une température de bruit thermodynamique valant :  $T_{IN}(RX) \approx 1100°K$ . (Note : vous aurez moins de bruit si vous pointez l'antenne en direction du ciel la nuit qui a une température valant environ 250°K sur 144MHz)

La puissance du bruit à l'entrée du préampli de réception vaut :  $P_{NOISE} = K * T * B$  [Watts]  
Exprimé en décibels :

$$P_{NOISE}[dBm] = 10 * \text{Log}(K * T * B) + 30dB$$

(Les +30dB à la fin sont pour la conversion watts → milliwatts)

Dans notre exemple (STN 144MHz en communication tropo) :

- $K = 1.38 * 10^{-23}$  [Joules/°K] est la constante thermodynamique de Boltzmann
- $T = 1100°K$  est la température de bruit à l'entrée du système de réception
- $B =$  largeur de bande du récepteur. En SSB, elle vaut :  $B=2500\text{Hz}$  (=2500[1/sec])

On obtient  $P_{NOISE}(RX) = -134dBm$

La dynamique du récepteur

La dynamique du signal reçu est la différence entre le signal reçu et le bruit propre à l'entrée du récepteur. Dans notre exemple :

$$Dyn = \frac{S}{N} = P_{RX} - P_{NOISE} = -16dBm - (-134dBm) = 118dB$$

Cela signifie que pour pouvoir discriminer un signal DX de faible amplitude de ce « puissant trediton » qui arrive par l'antenne sur une fréquence voisine, le récepteur doit avoir une dynamique de réception égale ou meilleure que 120dB !

Cette dynamique exige un filtrage efficace utilisant combinaison de filtres à quartz et céramiques, et une tête d'entrée de réception résistante aux signaux forts.

Le préampli d'entrée de la station de base devra impérativement être mis « OFF », pour éviter la saturation au niveau du premier mélangeur qui précède les filtres de réception. En effet, le signal étant amplifié par +20dB au niveau du préampli de réception situé au mât d'antenne, et en comptant 2dB de pertes dues au coaxial entre la sortie du préampli et le récepteur, un signal arrivant avec une amplitude de -15dBm depuis l'antenne aura alors une amplitude de  $-15+(20-2)=+3\text{dBm}$  (2mW) à l'entrée de la station. Si le préampli interne de la station de base est « ON », alors le récepteur s'effondrera lamentablement et plus aucune réception ne sera possible tant que le signal fort sera présent (Rem. : avec un tel signal, aucune garantie, même si le préampli interne du transceiver est OFF...).

La réception peut aussi être perturbée par du bruit parasite émis par la station « forte » en-dehors de sa bande normale d'émission. Il y a le « splatters » (éclaboussures de part et d'autres de la fréquence d'émission) causé par une puissance de drive excessive sur le PA. Cependant, le même phénomène peut se produire lorsque le récepteur est saturé par la puissance reçue alors que le signal du TX « fort » est propre...

Un autre phénomène, encore plus gênant, est apparu il y a déjà un certain temps. Sur certains TX, la modulation SSB n'est pas générée selon la méthode classique « analogique », mais par un système digital suivi d'une conversion D/A (Conversion Digitale → Analogique). Ces systèmes ont une dynamique limitée. Autour de la fréquence d'émission, ils émettent du bruit blanc, causé par la « granulosité » de la modulation digitale et de la conversion D/A, l'amplitude de ce bruit blanc étant souvent autour de -90dB par rapport au niveau de crête du signal de phonie SSB. Si vous recevez cette station avec un niveau de +120dB au-dessus du bruit propre de votre RX, vous avez alors en prime sur toute la bande un niveau de bruit blanc qui est +30dB au-dessus de votre propre plancher de bruit. Ce bruit est présent tant que l'opérateur de ce magnifique équipement tient le PTT pressé ; il ne varie pas avec la modulation, donc impossible d'espérer entendre quelque chose entre ses syllabes, comme c'est parfois possible dans le cas du splatters... (Personnellement, je préfère alors le splatters)

### Conclusion

Cet article a expliqué la formule permettant de calculer un bilan de transmission en espace libre. La condition « espace libre » est rarement réalisée lors de communications terrestres, à cause de l'effet du sol ou les différents obstacles entre le TX et le RX.

Des stations bien dégagées en points hauts peuvent cependant se retrouver en conditions de propagation « espace libre » entre-elles. Lorsqu'elles ont leurs antennes face-à-face, la conséquence est un signal de très forte amplitude à l'entrée du récepteur.

La réception des stations faibles voisines sur la bande peut devenir difficile, voire carrément impossible. Les causes de cette défaillance sont multiples, liées à une dynamique insuffisante de l'émetteur, à du splatters produit par l'émetteur, ou à une chaîne de réception médiocre. Une combinaison des différentes défaillances est aussi possible. Une certaine dose de philosophie est alors nécessaire...