

Dynamique des STN de contest 144MHz.
Partie 1 : Bilan de transmission en espace libre et dynamique des signaux
Par François, HB9BLF

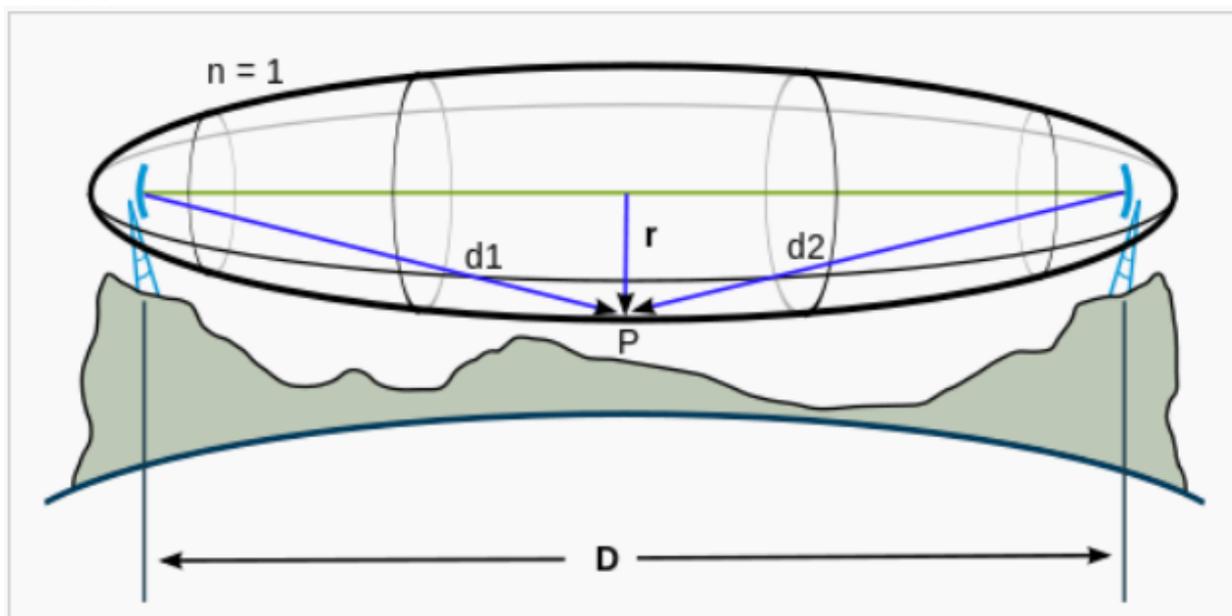
Sommaire :

1. Espace libre ; l'ellipsoïde de Fresnel
2. Rappel : le décibel
3. Calcul du bilan de propagation ; l'équation de Friis
4. Exemple de calcul sur 144MHz
5. Bruit de fond et dynamique du signal reçu
6. Conclusions

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, avec un exemple de calcul du bilan de liaison entre 2 stations de contest en points hauts sur 144MHz. Le signal reçu est comparé au bruit thermique reçu par l'antenne (dynamique du signal reçu). Cela indique quelle dynamique est nécessaire pour un transceiver travaillant sur un point haut lors d'un contest 2m.

1. Espace libre ; l'ellipsoïde de Fresnel

La condition « espace libre » est rarement réalisée entre 2 stations radioamateurs. Il faut pour cela que la zone de Fresnel entre les antennes d'émission et de réception soit entièrement dégagée. Les ondes utilisent pour se propager un volume entre les 2 antennes, que l'on appelle la zone de Fresnel. Celle-ci 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 carrée 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 nécessaire à la propagation en espace libre entre les 2 antennes. Pour une distance D = 60Km et $\lambda = 2m$ (f=144MHz), le rayon de l'ellipsoïde de Fresnel vaut **r = 173m**

2. Rappel : Le décibel (dB) et le « 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 :

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



Les tableaux ci-après donnent quelques exemples chiffrés.

Rapport $\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$	G[dB]
1	0dB
2	+3dB
4	+6dB
5	+7dB
10 = 10 ¹	+10dB
20	+13dB
40	+16dB
50	+17dB
100 = 10 ²	+20dB
1000 = 10 ³	+30dB
10000 = 10 ⁴	+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 ⁻¹	-10dB
0,05 = 1/20	-13dB
0,025 = 1/40	-16dB
0,020 = 1/50	-17dB
1/100 = 10 ⁻²	-20dB
1/1000 = 10 ⁻³	-30dB
1/10000 = 10 ⁻⁴	-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** (dB-milliwatt) est une unité de puissance relative à 1 milliwatt.

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

Exemples

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 ($1\mu W = 10^{-3}mW$)	-30dBm
1 nano watt ($1nW = 10^{-6}mW$)	-60dBm
1 pico watt ($1pW = 10^{-9}mW$)	-90dBm
1 femto watt ($1fW = 10^{-12}mW$)	-120dBm
1 atto watt ($1aW = 10^{-15}mW$)	-150dBm

3. Calcul du bilan de propagation ; l'équation de Friis

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 TX

$G_{ANT}(TX)$: Gain de l'antenne d'émission

$G_{ANT}(RX)$: Gain de l'antenne de réception

λ : 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 :

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

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.

La proportionnalité avec λ^2 (longueur d'onde) est moins intuitive. Elle peut être expliquée de la façon suivante : L'antenne de base en radio est le dipôle demi-onde (gain = +2,15dB). La largeur 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 λ . D'où le terme en λ^2 dans l'équation. Le terme 4π au dénominateur est lié à la surface d'une sphère de rayon D (distance) centrée sur l'antenne d'émission ($S = 4\pi D^2$).

4. Exemple de calcul sur 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 à 2 antennes couplées (bien optimisées) de 8m de longueur de boom : $G_{ANT}(TX) = +18.5dB$

Gain de l'antenne de réception.

Pour simplifier, le même système d'antennes du côté RX : $G_{ANT}(RX) = +18.5dB$

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.

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

Distance TX – RX: 60km (D = 60000m)

Calcul du dernier terme de l'équation (2) qui tient compte de la distance entre les 2

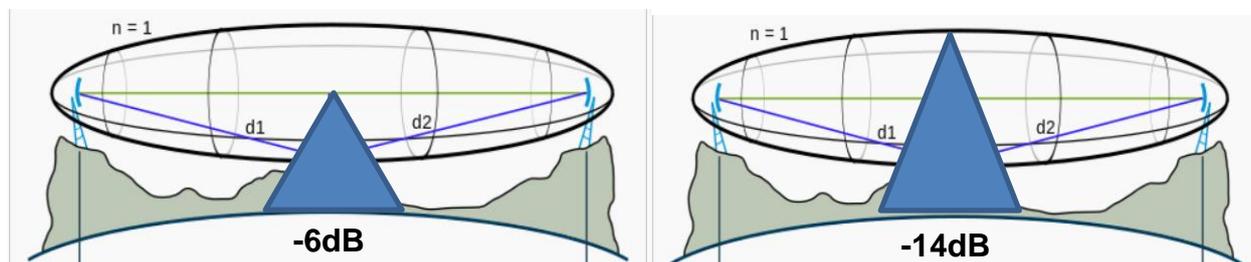
stations et de la longueur d'onde : $10 * \text{Log} \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 = -111dB$

La puissance reçue par le préampli de réception vaut :

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

Un signal très fort à l'entrée du récepteur...

Ce calcul est valable si la zone de Fresnel est totalement dégagée. Si elle est partiellement obstruée, on bénéficiera d'une atténuation supplémentaire sur le signal de la station voisine. Deux exemples sont donnés aux figures ci-dessous.



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 exactement 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 = Wikipédia). Cela peut grandement aider à réduire le QRM entre des stations proches.

5. Bruit de fond et dynamique du signal reçu

Nous allons maintenant comparer l'amplitude du signal reçu avec le bruit propre du système de réception.

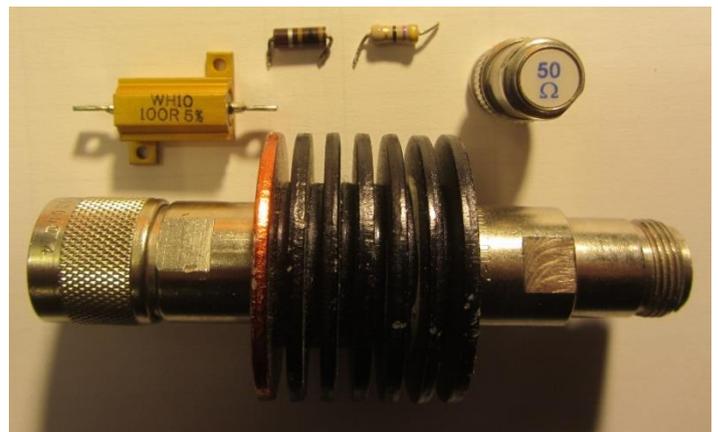
Le bruit total à l'entrée du système de réception est la somme du bruit généré par le préampli RX et du bruit de fond capté par l'antenne ; ce dernier est envoyé par le sol et par l'espace. Sur 144MHz, l'antenne captera le bruit du sol, qui provient de l'agitation thermique normale.

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.

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 la température thermodynamique de $T=300°K$.

Le bruit d'une résistance

Dans un solide conducteur ou semi-conducteur, l'agitation moléculaire liée à la température dévie les électrons de leur trajectoire. Cela provoque l'apparition d'un bruit (thermique) « blanc » qui se superpose au courant électrique présent. Le niveau de ce bruit thermique est proportionnel à la température absolue. Le bruit généré par l'agitation moléculaire dans une résistance vaut :



Sources simples de bruit thermique...

$$P_{NOISE} = KTB \text{ [Watts]}$$

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

$$K = 1,38 * 10^{-23} \text{ [Joules/°K]} \quad K \text{ est la constante de Boltzmann}$$

$$T = \text{température absolue [°K]}$$

$$B = \text{largeur de bande [Hz]}$$

Niveau de bruit généré à température ambiante ($T = 290°K$) par une résistance dans une largeur de bande de réception «SSB» valant $B = 2500\text{Hz}$:

$$P_{NOISE} = 1,38 * 10^{-23} * 300 * 2500 = 10,4 * 10^{-18} \text{ [Watts]} = 10,4 * 10^{-15} \text{ mW}$$

$$\text{En dBm : } P_{NOISE} = 10 \log(10,4 * 10^{-15}) = -140 \text{ dBm}$$

Le bruit thermique capté par l'antenne de réception

Si l'antenne est orientée en direction d'une zone «froide» du ciel, elle reçoit sur 144MHz un bruit thermique correspondant à une température $T \approx 250^{\circ}\text{K}$. Si elle tire sur l'horizon, elle capte le bruit du sol qui a une température moyenne $T \approx 1000^{\circ}\text{K}$ sur 144MHz. L'antenne envoie alors à l'entrée du préampli de réception un niveau de bruit valant $P_{NOISE}(Ant) = -135\text{dBm}$ (dans une largeur de bande « SSB » de 2500Hz). Dans ce calcul, on a négligé le bruit du préampli de réception qui, avec les semi-conducteurs actuels, est inférieur à 100°K .

La dynamique (Rapport Signal/Bruit)

La dynamique du signal reçu est la différence entre le signal reçu (Signal) et le bruit (Noise) à l'entrée du récepteur. Dans notre exemple cité plus haut, le niveau du signal à la sortie de l'antenne RX était $P_{RX} = -16\text{dBm}$. La dynamique du signal reçu vaut alors :

$$Dyn = \frac{S}{N} = P_{RX} - P_{NOISE} = -16\text{dBm} - (-135\text{dBm}) = 119\text{dB}$$

Le signal de la station voisine est reçu avec un niveau qui est 119dB au-dessus du bruit de fond. Pour éviter le QRM, il faudra que le niveau du bruit (ou des signaux parasites) généré par la station TX en dehors de son canal d'émission soit **120dB plus bas** que son niveau nominal de puissance et aussi...

Et aussi que votre récepteur supporte ce niveau de signal reçu sans générer d'artefacts.

- Le signal de votre VFO devra être suffisamment propre (niveau de bruit «latéral» faible), pour éviter le QRM par effet de «mélange réciproque» avec le signal reçu. Ce phénomène ne dépend pas de la qualité du signal du TX, mais uniquement de la qualité de l'oscillateur du VFO du RX.
- La tête d'entrée du RX (LNA, mixer → premier filtre à quartz) devra supporter la forte amplitude du signal reçu sans être saturée.

6. Conclusions

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 des différents obstacles entre le TX et le RX.

Cependant, des stations bien dégagées en points hauts peuvent se retrouver en conditions de propagation « espace libre » entre-elles. Lorsqu'elles ont leurs antennes orientées face-à-face, la conséquence est alors un signal de très forte amplitude à l'entrée du récepteur. Dans ce cas, la réception des stations faibles voisines sur la bande peut devenir difficile, voire carrément impossible.

Les causes du QRM sont multiples : dynamique insuffisante de l'émetteur (bruit latéral, éventuellement « splatters »), ou une chaîne de réception médiocre. Une combinaison des différentes défaillances est hélas souvent réalisée en pratique. A moins de tourner l'antenne ailleurs, une certaine dose de philosophie est alors nécessaire...

Les 2 articles à venir décriront les mesures de dynamique sur les parties TX et RX de 18 stations 144MHz.