

Merci à Olivier ADLER pour tes observations et commentaires bien utiles en sa qualité d'ingénieur du son..

Les décibels

Une multitude de définitions

. . dB dB dB dB dB dB dB dB dB dB dB dB dB

Les décibels sont communément utilisés en audio et ils font communément référence au niveau acoustique de la musique, à celui dans les salles de spectacle, au niveau des nuisances sonores de différentes sources.

A l'origine, c'est **Alexander Graham Bell**, physicien américain, professeur pour sourds et muets et l'un des inventeurs du téléphone qui a établi la première échelle logarithmique de mesure acoustique car l'impression auditive varie approximativement selon le logarithme de la puissance reçue par l'oreille. Les premiers ingénieurs téléphonistes de **Bell-Laboratory** (1924) ont introduit la *transmission unit* (TU) pour caractériser l'atténuation des lignes de transmissions dues aux pertes électriques et en 1927 le CEI renommara cette unité le décibel dB. Son emploi, très pratique, s'est vite généralisé à d'autres techniques.

En électronique et en télécommunication, ils sont employés pour caractériser les différents systèmes ou mesurer et comparer leurs performances comme les courbes de réponse des amplificateurs, des filtres, les rapports signal sur bruit, la pureté spectrale des oscillateurs entachée par du bruit de phase, les pertes des lignes de transmission, les gains d'antenne, les bilans de liaison, etc.

Dans la chaîne fonctionnelle d'un émetteur ou d'un récepteur radio, l'utilisation des décibels se pratique à tous les étages, du microphone à l'antenne et de l'antenne au haut-parleur. Dans la liaison radioélectrique entre un émetteur et un récepteur, les décibels sont utilisés dans la chaîne complète du bilan de liaison. C'est ainsi que les radioamateurs caractérisent la qualité de leur communication par la mesure du **S**, de 0 à 9 + quelques dB et font directement référence aux décibels à chaque report de communication.

Pour bien comprendre leurs différentes utilisations et définitions employées avec les décibels, il faut déjà faire référence aux mathématiques avec les logarithmes, c'est pourquoi cette présentation fait suite à celle intitulée **logarithmes et exponentielles en électronique** qu'il est préférable d'avoir lue en prérequis. L'emploi des logarithmes permet de simplifier certains calculs car la multiplication entre des grandeurs se réduit à une addition des **log** ainsi que la division est remplacée par une soustraction ainsi que d'autres opérations vues dans cette première représentation.

Notation : dans ce chapitre sur les décibels, nous n'utiliserons que les logarithmes décimaux, il n'est pas nécessaire de rappeler la valeur de la base : $\gamma = \log_{10}(x) = \log(x)$

Résumé sur les logarithmes décimaux et quelques valeurs à retenir :

si $x > 0$, on peut définir $y = \log(x) \Leftrightarrow x = 10^y$

$$\log(1) = 0 \quad , \quad \log(0) = -\infty \quad , \quad \log(10) = 1 \quad , \quad \log(100) = 2 \Leftrightarrow 100 = 10^2 \quad , \quad \log(10^n) = n$$

$\log(2) = 0,3 \dots$ $\log(0,5) = -0,3 \dots$ $\log(20) = 1,3 \dots$ $\log(200) = 2,3 \dots$ caractéristique, mantisse

$$\log(a.b) = \log(a) + \log(b), \quad \log(\text{produit}) = \text{somme}(\text{des log}) ,$$
$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log(a) - \log(b) , \quad \log(\text{division}) = \text{différence des log}$$
$$\log(a^x) = x \cdot \log(a) \quad , \quad \log(a^{x/y}) = \frac{x}{y} \cdot \log(a) \quad , \quad \log\sqrt{x} = \log(x^{1/2}) = \frac{1}{2} \log(x)$$

Les définitions :

Bel : $x_B = \log_{10}(P_2/P_1)$. On écrira ici $\log_{10}$ ou directement $\log$ pour logarithme base 10.

C'est le logarithme d'un rapport de puissance comme par exemple avec les puissances mises en jeu entre la sortie et l'entrée d'un amplificateur électronique. Ce rapport n'a évidemment pas d'unité, son logarithme exprimé en Bel n'est pas une unité physique du système international. Peu utilisé, on préfère, au Bel, la sous-unité le dB, dix fois plus petite : $10\text{dB}=1\text{B}$.

décibel : $x_{\text{dB}} = 10 \cdot \log(P_2 / P_1)$, $P_2 / P_1 = 2$ correspond à 3dB. C'est dix fois le log du rapport des puissances, pour une amplification ce gain est positif, pour une atténuation, il est négatif

Calcul mental avec la mantisse x et la caractéristique n :

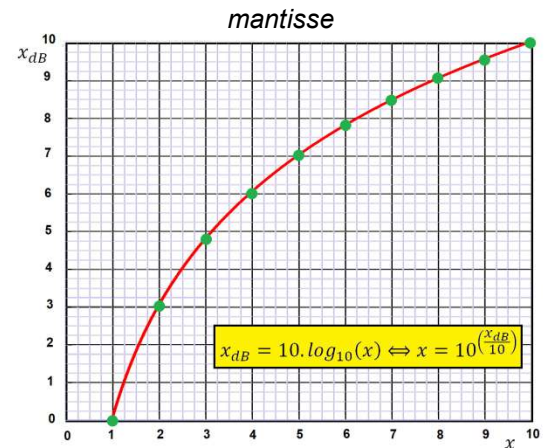
Algorithme

pour $1 < x < 10$, on pose $x_{\text{dB}} = 10 \cdot \log_{10}(x) \Leftrightarrow x = 10^{(x_{\text{dB}}/10)}$
 pour $X < 1$ ou $X > 10$, faire $X = x \cdot 10^{+/-n}$
 calculer $X_{\text{dB}} = x_{\text{dB}} +/-10 \cdot n$

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	x
x_{dB}	0.0	3.0	4.8	6.0	7.0	7.8	8.5	9.0	9.5	10.0	x_{dB}

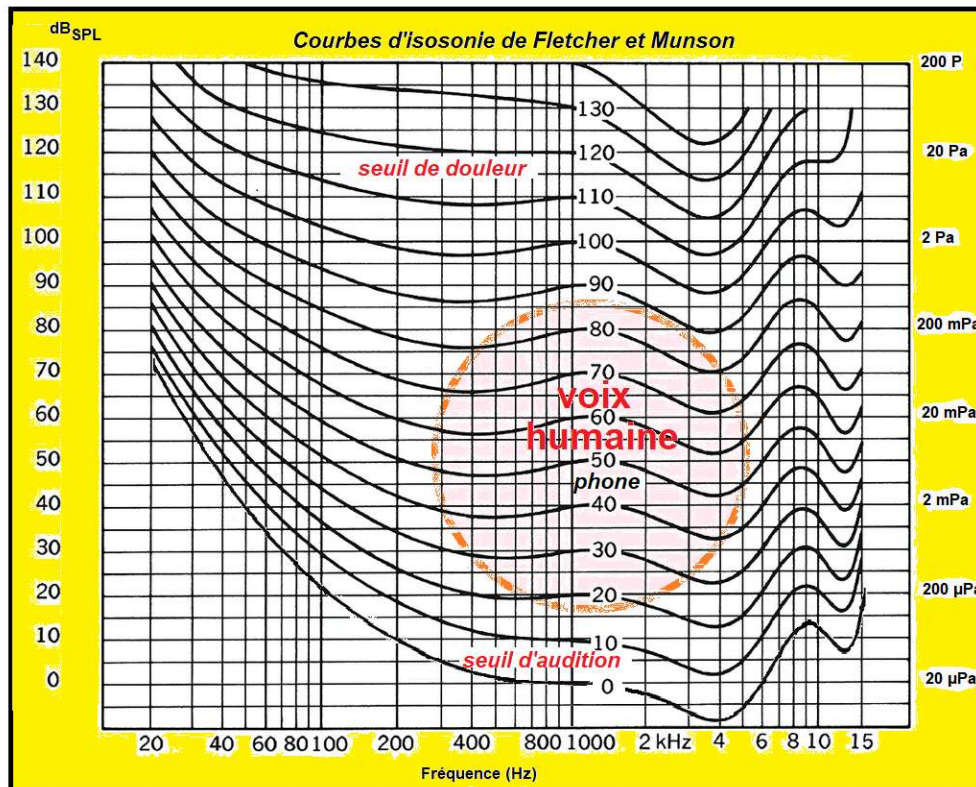
mémoriser quelques valeurs

ex. 1 : $X = 7000 = 7 \cdot 10^3$, $X_{\text{dB}} = (8,5 + 30) = 38,5 \text{ dB}$
 ex. 2 : $X = 0,003 = 3 \cdot 10^{-3}$, $X_{\text{dB}} = (4,8 - 30) = -25,2 \text{ dB}$
 ex. 3 : $X_{\text{dB}} = 39 \text{ dB} = (9 + 30)$, $X = (8 \cdot 10^3) = 8000$
 ex. 4 : $X_{\text{dB}} = -4 \text{ dB} = (6 - 10)$, $X = (4 \cdot 10^{-1}) = 0,4$



Psycho-acoustique : sensibilité de l'oreille, Fletcher et Munson, les échelles pondérées, notations musicales, quelques repères de niveau sonore.

Pour les besoins de la téléphonie, deux physiciens de Bell Laboratorys, Fletcher et Munson ont établi en 1933 les courbes d'isotonie moyenne de l'audition humaine. Notre perception du niveau sonore dépend de la fréquence, nous sommes le plus sensible entre 2 et 4 kHz cette perception n'est pas la même selon le niveau de pression acoustique. On mesure la pression acoustique p_m (*sound pressure level*) en dB_{spl} avec $x_{\text{dB}_{\text{spl}}} = 20 \cdot \log(p_m / 2 \cdot 10^{-4} \text{ } \mu\text{bar})$ puis on établit une échelle de valeur graduée en **phone** à 1kHz ($n \text{ phone} = n \text{ dB}_{\text{spl}}$ à 1kHz) et on recherche pour une autre fréquence, en agissant sur le niveau, à avoir la même impression acoustique. Cette recherche d'impression de niveau constant selon la fréquence donne ces courbes d'isotonie graduées en phone. Aux basses fréquences, Il faut relever le niveau car l'oreille est moins sensible aux graves et complètement insensible aux infrasons, par contre faut baisser le niveau dans la plage où nous sommes très sensibles (2 à 4kHz). Au-delà de 15kHz l'oreille redevient sourde et nous ne percevons pas les ultrasons. Le seuil d'audition varie selon les individus, il se situe entre 0 et 10 phones au-delà de 110 phones on atteint le seuil de douleur. Ces courbes varient selon les individus et avec l'âge ou les accidents de l'oreille. Fletcher et Munson ont fait des statistiques sur des milliers d'individus et ont moyenné ces mesures pour donner ces courbes d'isotonie dites de l'oreille moyenne. Ces mesures sont faites avec des notes pures (sinusoïdales) et sont différentes avec des sons composés où apparaissent des effets de masquage. On retiendra qu'un chuchotement de la parole humaine se situe à environ 10dB_{spl} , le niveau sonore d'un spectacle de grand orchestre à environ $80 \text{ dB}_{\text{spl}}$, le bruit à trois mètres d'un réacteur d'avion avec des effets destructifs pour nos oreilles à environ $120\text{dB}_{\text{spl}}$, le seuil de douleur (extrêmement dangereux) se situe à $140\text{dB}_{\text{spl}}$.



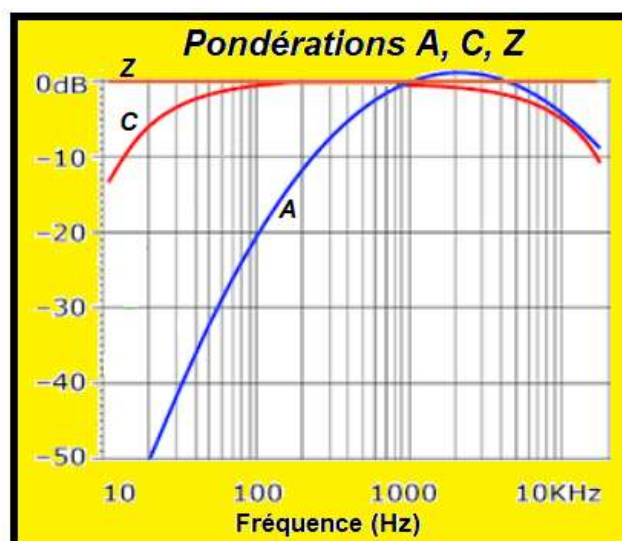
Ces courbes sont toujours d'actualité et elles sont modélisées par une équation dans la norme acoustique iso226 :2023 lignes isophoniques normales (*Normal equal-loudness-level contours*).

Sonomètres: Ces appareils permettent de mesurer le niveau sonore, ils utilisent des courbes de filtrage pondérées, la courbe A est à l'image de la courbe de sensibilité de l'oreille humaine, elle est utilisée pour les faibles bruits comme la parole et la musique et donne des résultats en dB_A. Il existe une courbe B qui n'est plus employée, la courbe C est utilisée pour mesurer toutes les ambiances sonores fortes, bruits et perturbations, elle tient plus compte des basses fréquences et donnent des résultats en dB_C. Il existe aussi une courbe D pour les bruits très forts comme celui des réacteurs d'avion par exemple.

La courbe Z permet de mesurer les dB_{SPL} (*sound pressure level*), pour la pression acoustique sans pondération harmonique.

Le dBA est aussi utilisé pour la mesure du bruit électrique, sur des systèmes audio, avec une paire d'autres unités, comme le bruit psophométrique, utilisé surtout en téléphonie (dBmp). Il existe d'autres pondérations pour la mesure du bruit, surtout dans le domaine temporel, peak, quasi-peak.

http://www.inrp.fr/JIPSP/phymus/m_lexiq/lexbc1.htm



Notations musicales: bien avant l'apparition des décibels, les musiciens repèrent depuis des siècles le niveau sonore sur les partitions par des petites abréviations qui représentent des évolutions de l'ordre de 10dB ce qui donne l'impression de doublement du niveau :

sons faibles : *ppp* : *pianississimo* 30dBA, *pp* : *pianissimo* 40dBA *p* : *piano* 50dBA

sons moyens : *mp* : *mezzo piano* , *mf* : *mezzo forte* de l'ordre de 60dBA

sons forts *f* : *forte* 70dBA *ff* : *fortissimo* 80dBA *fff* : *fortississimo* 90dBA

Avec la généralisation du numérique en audio et en enregistrement musical apparaissent des nouvelles dénominations pour la correspondance du niveau nominal analogique et l'échantillonnage en vue de la numérisation : le dBFS (full scale) , le dBTP ou dB True peak. c'est un dBFS qui tient compte des peaks inter-échantillons

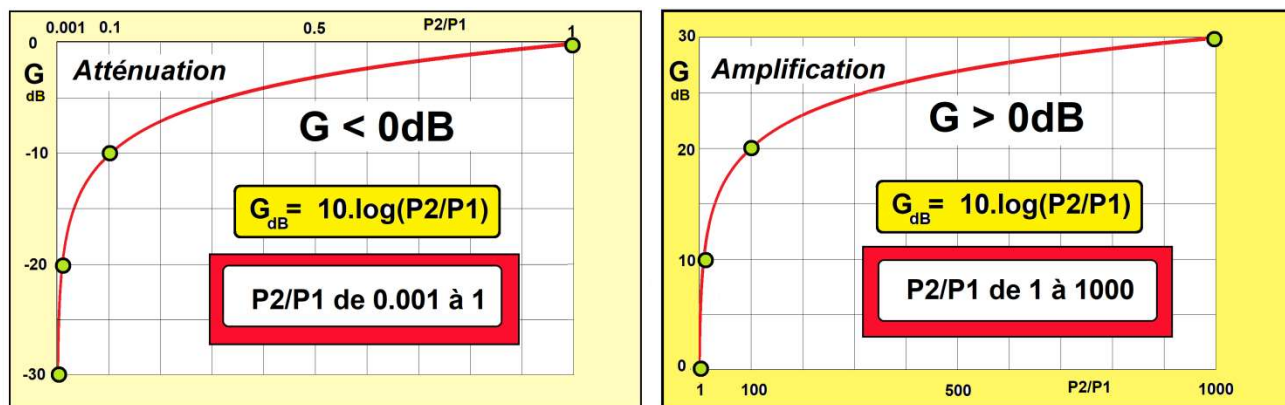
Les décibels en électronique :

Gain en tension et dB : les amplificateurs, les atténuateurs, filtres et autres peuvent être définis par leur gain en tension exprimé en décibel. Si les deux résistances de charge en entrée et en sortie sont identiques, du fait de la loi de Joule pour les puissances électriques $P = U^2/R$, on aura pour un gain en tension : $x\text{dB} = 20.\log_{10}(U_2 / U_1)$.

Gain en courant et dB : Certains dispositifs sont définis par leur gain en courant exprimé en décibel. De même si les deux résistances sont identiques, du fait de la même loi de Joule pour les puissances électriques $P = RI^2$, on aura pour un gain en courant: $x\text{dB} = 20.\log_{10}(I_2 / I_1)$.

Courbes logarithmiques des amplifications et atténuations :

Le passage par les logarithmes permet de faire une expansion des faibles valeurs et une compression des fortes valeurs comme on peut le voir sur ces graphes.



Ces deux courbes d'une étendue de 30dB soit un rapport de 1000, montrent l'effet d'expansion des faibles valeurs (courbe plus verticale) et de compression des fortes valeurs (courbe plus horizontale) ceci grâce à l'emploi des logarithmes.

Atténuation		Amplification	
Rapport P2/P1	xdB	Rapport P2/P1	xdB
1	0	1	0
0,5	-3	2	3
0,25	-6	4	6
0,1	-10	10	10
0,01	-20	100	20
0,001	-30	1000	30

Calcul inverse: Nous sommes souvent amenés à revenir de la valeur exprimée en dB au rapport réel, comme nous avons pu le voir, ce passage est donné par $10.\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = X_{dB} \Leftrightarrow \frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{X_{dB}}{10}}$. L'emploi d'une calculatrice scientifique peut s'avérer parfois utile.

A retenir :

P2/P1	1/100	1/10	1/4	1/2	1	2	4	10	100
dB	-20	-10	-6	-3	0	3	6	10	20

Exemple de calcul : $A=40=4*10$ d'où $G=6+10=16\text{dB}$, $G=43\text{dB}=20+20+3$ d'où $A=100*100*2=20000$

Quelques exercices :

EX1 : quel est le gain en dB d'un amplificateur RF linéaire de puissance recevant 2,5 Watts en entrée et fournissant 35 Watts en sortie coté antenne ?

EX2 : on augmente de 3dB le gain d'un amplificateur dont l'amplification en puissance est de 10. Quelles sont les valeurs de la nouvelle amplification en puissance et celle de son nouveau gain exprimé en dB ?

EX3 : on insère en cascade un atténuateur de 3dB suivi de deux amplificateurs de 20 dB. Quelle est l'amplification et le gain en dB de cet ensemble ?

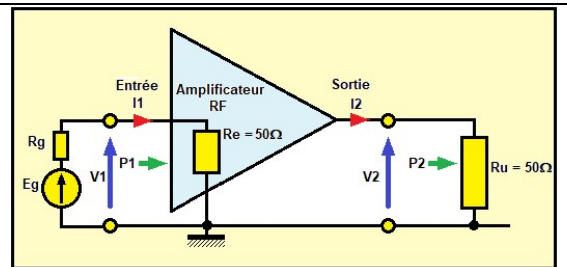
Dans les applications RF la valeur des résistances de charge en entrée et en sortie sont souvent les mêmes $R_e = R_u = R$ par exemple 50Ω , on a alors :

$$10 \cdot \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2^2/R}{V_1^2/R} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{V_2^2}{V_1^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{V_2}{V_1} \right)$$

ainsi que :

$$10 \cdot \log \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{RI_2^2}{RI_1^2} \right) = 10 \cdot \log \left(\frac{I_2^2}{I_1^2} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{I_2}{I_1} \right)$$

Les trois gains en dB de la puissance, de la tension et du courant sont identiques : $GP_{dB} = GV_{dB} = GI_{dB}$



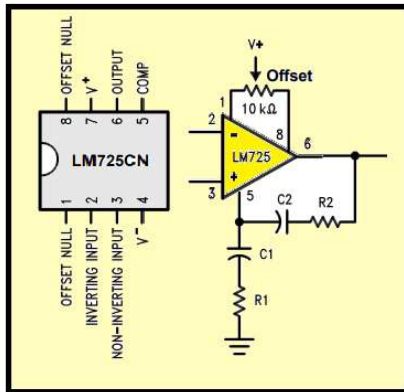
Ex4: Cet amplificateur RF reçoit une puissance d'entrée de 20mW et délivre en sortie dans la charge $\frac{1}{2}$ W, déterminez toutes les valeurs : V_1 , I_1 , V_2 , I_2 , les gains en dB.

On considère maintenant un amplificateur de puissance comme ci-dessus mais ayant des valeurs de R_e et R_u différentes entre elles, montrez que : $GP = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R_u}{R_e} \cdot \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 = \frac{R_e}{R_u} \cdot \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$ et en déduire les expressions en dB.

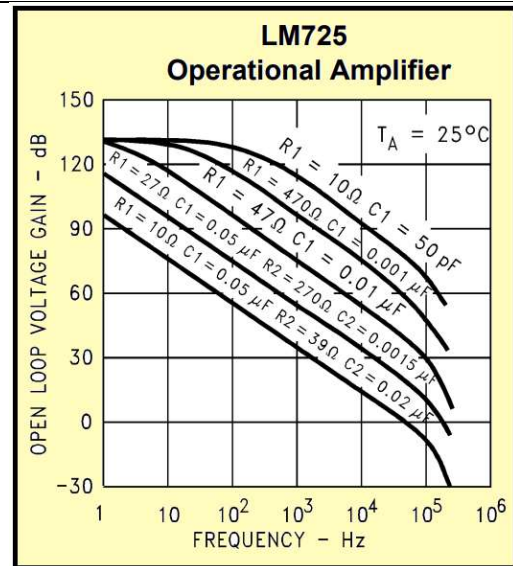
Un amplificateur de puissance RF possédant une impédance d'entrée de 300Ω débite en sortie sur une charge de 50Ω . Pour une tension RF en entrée V_e de 0,1V, la tension de sortie V_s est de 10V. Quel est son gain en puissance ?

$$G = 20 \cdot \log \left(\frac{U_2}{U_1} \right)$$

Cette expression peut en réalité, être utilisée indépendamment des valeurs de résistance d'entrée ou de charge en sortie et le gain en tension n'a alors plus de lien avec celui des puissances. C'est le cas par exemple avec les amplificateurs opérationnels. Ils ont un gain en tension en boucle ouverte pouvant atteindre entre 100 et 130dB. Le gain en puissance n'a quasiment aucun sens, surtout avec un AOp en boucle ouverte (BO).



AOp compensé en BO

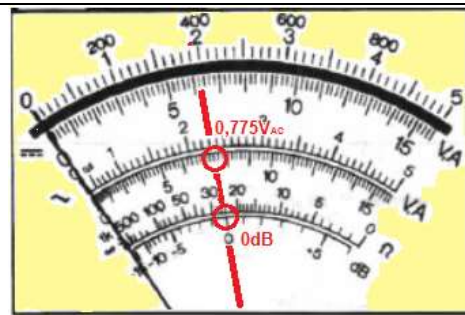


Graduation des échelles de voltmètre AC en dB ou dBu: nos anciens multimètres à aiguille disposaient d'une échelle graduée en décibel. Conventionnellement, on choisit comme niveau de référence V_0 la tension qui dissiperait 1 mW dans une résistance de 600Ω (impédance normalisée des lignes téléphoniques ou télégraphiques) : 0,775V qui correspondra à 0dBu.

$$P = \frac{V_0^2}{R} \rightarrow V_0 = \sqrt{PR}$$

$$V_0 = \sqrt{10^{-3} \cdot 600} = \sqrt{0,6} = 0,775V$$

La figure voisine représente en rouge la position de l'aiguille quand elle indique 0dB avec la correspondance V_0 lue en VAC sur l'échelle 1,58V. Le calibre suivant de 5V pleine échelle se situe dans un rapport de $\sqrt{10} = 3,16$ au-dessus, ce qui donne une incrémentation de 10 dB de la lecture pour ce nouveau calibre. Comme chaque calibre successif se situe toujours dans ce rapport ($15,8/5=3.16$), chaque changement de calibre amène à un saut de 10dB supplémentaire.



radio-nostalgie

Ex5: Vérifiez que si $R > 600\Omega$, on doit soustraire $10 \cdot \log_{10}(R/600)$ à l'indication de puissance.

Quelle opération faut-il faire pour $R < 600\Omega$?

Les décibels peuvent être référencés à des grandeurs précises $x\text{dB}_{P_0} = 10 \cdot \log(P/P_0)$ et ce principe donne naissance à une grande variété de nouvelles définitions dBf, dB(μW), dBm, dBW, dBk, pour les mesures de puissance et les dBμ, dB(mV), dBV, pour les mesures de tension.

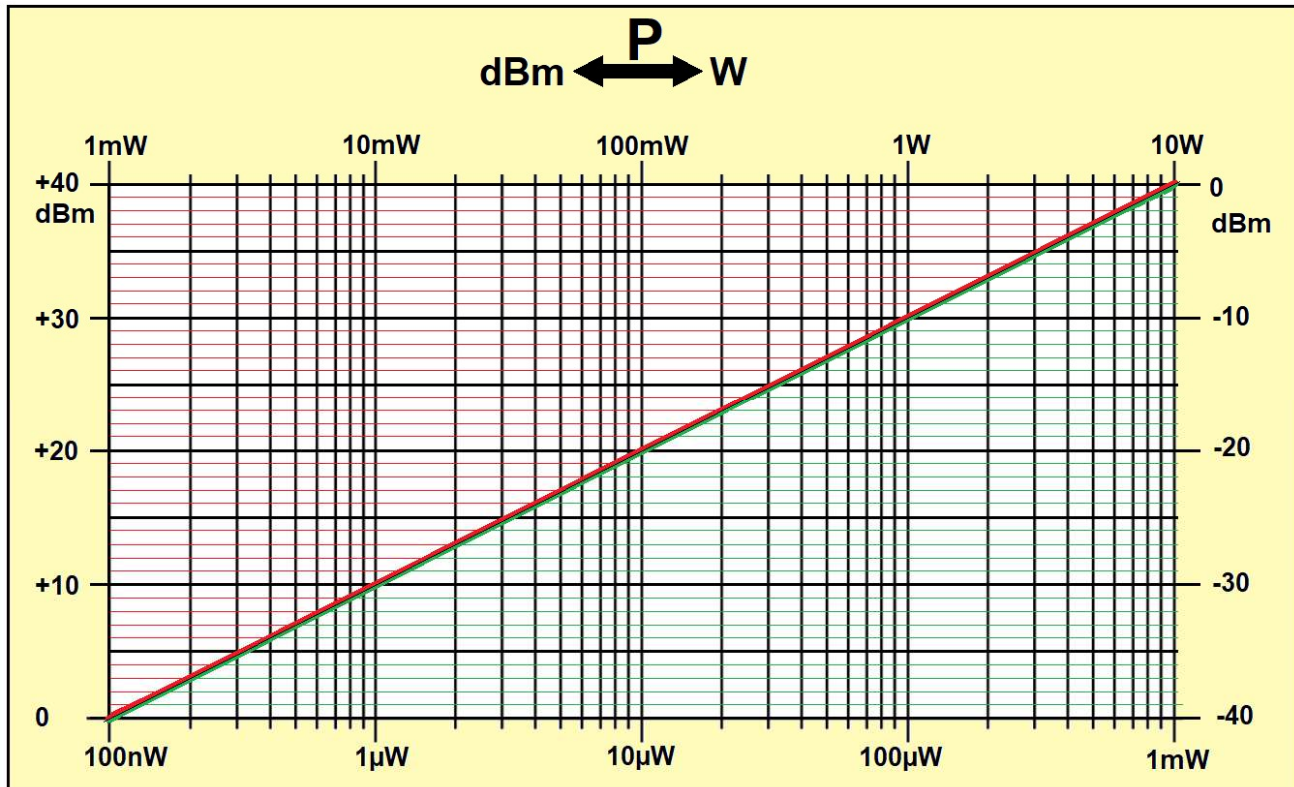
Les décibels pour mesurer la puissance des signaux RF:

Le dBm en référence au milliwatt : $x\text{dBm} = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{mW}})$,

La puissance **P** n'est pas exprimée dans l'unité de base du système **SI**, le Watt mais ici dans cette unité de référence le milliwatt **mW**, ce qui donne le **dBm**. Les puissances électriques des sources RF peuvent être exprimées en **dBm** c'est-à-dire, des décibels par rapport au milliwatt soit : P_2/P_1 avec $P_1 = 1\text{mW}$

Par cette définition, on aura donc 0dBm pour 1mW, 10dBm pour 10mW, 20dBm pour 100mW.

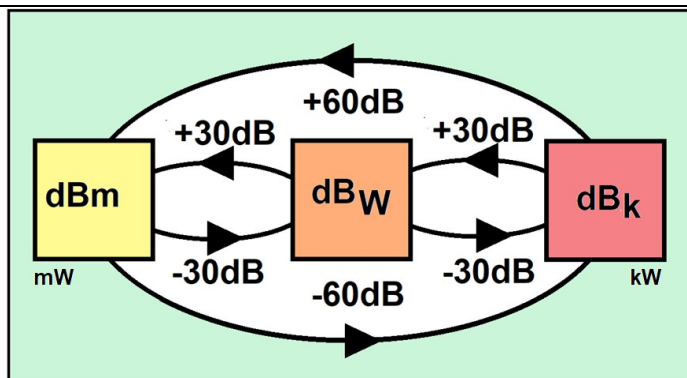
Le graphe semi-log suivant permet d'effectuer la conversion rapidement pour les puissances supérieures au milliwatt (partie haute) et pour les puissances faibles (partie basse).



milliwatt : $\text{xdBm} = 10 \cdot \log_{10}(P_{(\text{mW})})$
: P/P_0 avec $P_0 = 1\text{mW}$

watt : $\text{xdBW} = 10 \cdot \log_{10}(P_{(\text{W})})$
: P/P_0 avec $P_0 = 1\text{W}$

kilowatt : $\text{xdBk} = 10 \cdot \log_{10}(P_{(\text{kW})})$
: P/P_0 avec $P_0 = 1\text{kW}$

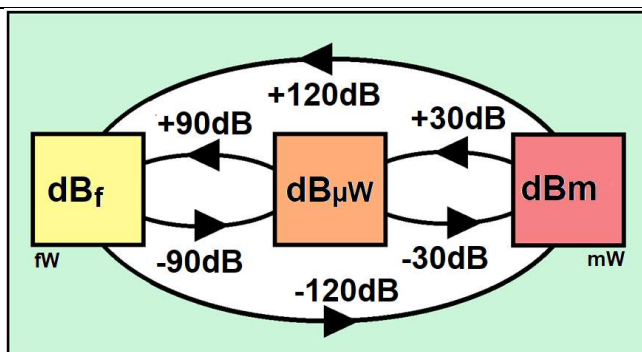


Ex6 : En Audio les haut-parleurs présentent une impédance de 8Ω , quelle est la tension efficace à leurs bornes pour une puissance de 0dBW puis de 10dBW ?

Pour les petites puissances il existe aussi le **microwatt** : $1\mu\text{W} = 10^{-6}\text{W}$, $\text{xdB}_{\mu\text{W}} = 10 \cdot \log_{10}(P_{(\mu\text{W})})$, c'est à dire : P/P_0 avec $P_0 = 1\mu\text{W}$ ce qui donne $\text{dB}_{\mu\text{W}} = \text{dBm} + 30$

Pour les très petites puissances de l'ordre de celles captées par une antenne de réception on utilise le **femtowatt** : $1\text{fW} = 10^{-15}\text{W}$, $\text{xdB}_\text{f} = 10 \cdot \log_{10}(P_{(\text{fW})})$, c'est à dire : P/P_0 avec $P_0 = 1\text{fW}$ ce qui donne : $\text{dB}_\text{f} = \text{dBm} + 120$

Comme grandeurs intermédiaires, le nanowatt et le picowatt peuvent parfois être utilisés.



Ex7: l'émetteur d'Allouis (164kHz en GO) qui par économie d'énergie n'émet plus en **AM** les émissions de France-Inter au grand désespoir des utilisateurs des grandes ondes et des passionnés de vieilles TSF mais seulement des signaux horaires en modulation de phase de la porteuse (où sont les économies !) a une puissance de 2MW. Quelle est sa puissance en **dBk**?

Ex8: **_microvolt et dBm.**

- 1: On mesure $1\mu\text{V}$ sur une charge de 50Ω quel est le niveau du signal en dBm ?
- 2: En déduire une relation simple qui exprime le niveau en dBm sur 50Ω pour une tension donnée en μV
- 3: En déduire une relation simple qui exprime le niveau en μV sur 50Ω pour une puissance P en dBm donnée.

Ex9: **_Préamplificateur d'antenne.**

Un préamplificateur d'antenne possédant une impédance d'entrée et de sortie adaptée à 50Ω reçoit un signal de -90dBm, il l'amplifie avec un gain de 10 dB, quelle est la tension de sortie ?

Ex10: **_: Amplification.**

Un générateur haute fréquence délivre au maximum un signal de 6dBm à l'entrée d'un amplificateur de puissance dont le gain est de 30dB.

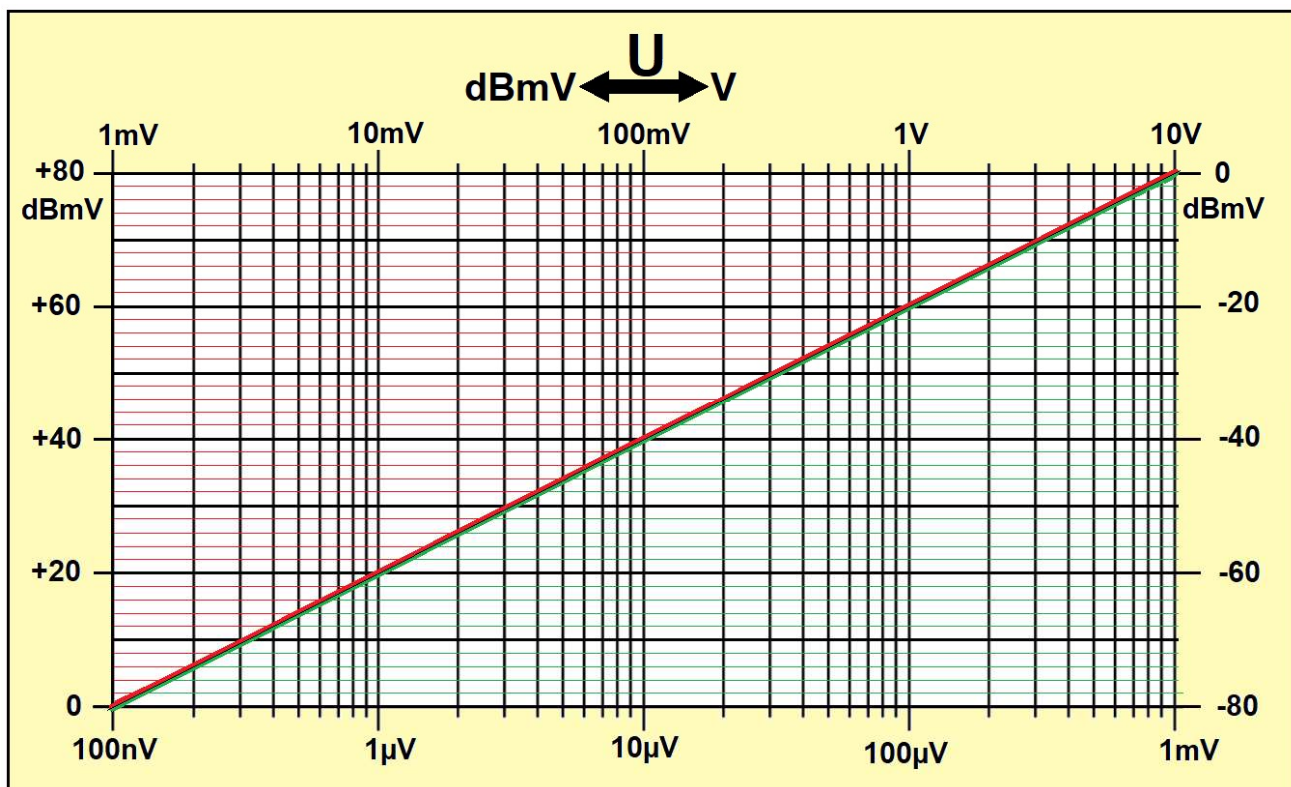
- Quelle est la puissance du générateur en mW ?
- Quelle est la puissance disponible en sortie de l'amplificateur ?

-L'amplificateur possède une puissance maximale d'utilisation en sortie de 8W.

Quelle devra être la valeur du gain d'un préamplificateur inséré entre ce générateur et l'amplificateur pour disposer de cette puissance maximale ?

-Lorsqu'on module le signal HF en amplitude, le générateur ne peut délivrer que 2 dBm, quelle nouvelle valeur de gain faut-il choisir pour ce préamplificateur ?

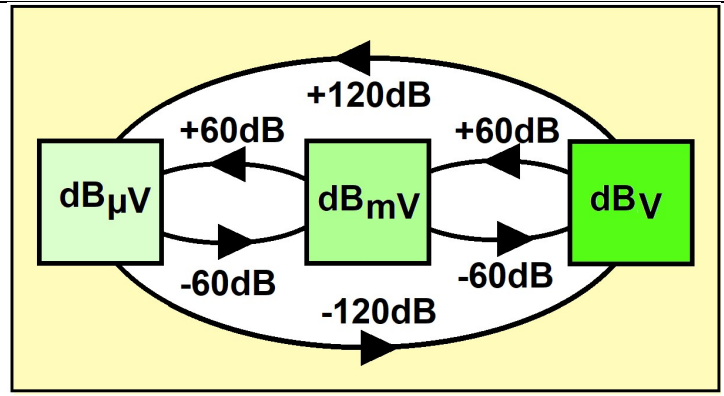
Les décibels pour mesurer le niveau de tension des signaux RF:



microvolt : $\text{xdB}\mu = 20.\log_{10}(U_{\mu\text{V}} / 1\mu\text{V})$, c'est à dire : U/U_0 avec $U_0 = 1\mu\text{V}$

millivolt : $\text{xdBmV} = 20.\log_{10}(U_{\text{mV}} / 1\text{mV})$, c'est à dire : U/U_0 avec $U_0 = 1\text{mV}$

volt : $\text{xdBV} = 20.\log_{10}(U_{\text{V}} / 1\text{V})$, c'est à dire : U/U_0 avec $U_0 = 1\text{V}$



Ex11: Sensibilité d'un récepteur.

La sensibilité d'un récepteur de radio est de $0,3\mu\text{V}$ pour un rapport signal à bruit : $10.\log_{10}((S+N)/N)$ de 10dB, l'impédance d'entrée est de 50Ω , quelle est sa sensibilité en dBm ?

par rapport à une référence : $\text{xdBr} = 10.\log_{10}(P_2/P_1)$, c'est à dire : P_2/P_1 avec $P_1 = P_r$ de référence

EX12: Antenne de télévision.

Trop proche d'un émetteur TV, il semblerait qu'une antenne 'bricolée' à faible gain puisse suffire, mais la présence d'échos secondaires et trop nombreux rend la réception difficile. Une antenne directive est nécessaire pour éliminer ces échos indésirables et le signal reçu est alors trop fort. Pour remédier à ce problème, on insère à l'entrée du récepteur un atténuateur.

Le signal reçu est de $500\mu\text{V}$, les pertes d'atténuation du câble coaxial sont estimées à 3dB, on admet une perte par désadaptation de 6dB (prises coaxiales, désadaptation d'impédance, etc....). On insère un atténuateur de 20dB dans l'entrée du téléviseur.

Quel est le niveau reçu en dBμ et en μV par le téléviseur ?

EX 13: un câble coaxial 50Ω de 25 mètres est utilisé en très haute fréquence (VHF). Il est chargé à son extrémité en sortie par une antenne fictive (résistance pure) de 50Ω , il est donc parfaitement adapté. La source (l'émetteur) fournit une puissance d'entrée P_1 de 100W, la puissance P_2 transmise dans la charge est de 50W. Quelle est l'atténuation en dB apportée par le câble ?

Quelle est l'atténuation linéique (par unité de longueur) de ce câble en dB/m ?

Quelles sont les tensions efficaces aux deux extrémités ?

Autre système d'unité logarithmique : Atténuation des lignes en Népers.

Le décibel basé sur le log décimal a eu son concurrent, le **Néper** basé sur le log népérien (Log ou ln).. Il a été utilisé jadis pour caractériser l'atténuation des lignes téléphoniques mais il n'a pas eu plus de succès. On définit le néper [Np] comme : $\text{xNp} = \text{Log}(V_2/V_1)$, c'est à dire en log népérien. :

$$1\text{Np} = 8,686\text{dB}.$$

On employait aussi le décinéper : dNp 10 fois plus petit

EX14: Dans une ligne à perte, une onde progressive sinusoïdale subit une atténuation au fur et à mesure de sa progression. Si les constantes linéiques de pertes (**R** et **G**) et les constantes linéiques réactives (**L** et **C**) sont constantes, la décroissance de l'amplitude de l'onde progressive est exponentielle et elle obéit à une loi en $e^{-\alpha.x}$. La constante linéique d'atténuation : α caractérise les pertes.

On considère deux points : x_1 et x_2 distants de Δx . On mesure le niveau de tension en chaque point : V_1 et V_2 . Donnez l'expression du rapport V_2/V_1 en fonction de la constante d'atténuation linéique et de Δx .

-On définit le néper [Np] comme : $\text{xNp} = \text{Log}(V_2/V_1)$,
Donnez l'expression de sa valeur pour Δx .

-L'atténuation exprimée en dB est donnée par $\text{xdB} = 20.\log_{10}(V_2/V_1)$
Montrez que l'atténuation d'un néper est égale à $1\text{Np} = 8,686\text{dB}$.

-Pour une puissance d'entrée P_1 de 1mW (de 0 dBm), quelle est la puissance après une atténuation d'1Np (en mW et en dBm) ?

-Les lignes sont aussi caractérisées par le coefficient d'atténuation **a**, exprimé en dB/m (dB par mètre).
Quelle est la relation entre **a** et α ?

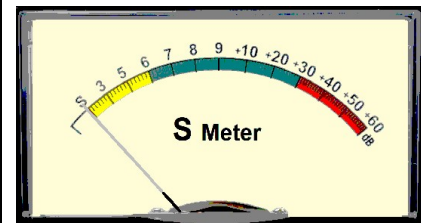
Les décibels en radio (RF) :

Appréciations de la qualité des signaux reçus RST et RSM.

Les points S

Points S Nos récepteurs radioamateurs ou professionnels et nos transceivers possèdent un S-mètre qui indique le niveau du signal reçu à l'entrée de l'appareil. Pour pouvoir signifier au correspondant les conditions d'écoute, les radioamateurs utilisent le code RS en téléphonie et le code RST en télégraphie (CW) ayant pour signification : R (*Readability*) lisibilité des signaux de 1 à 5, S (*Signal strength*) : force des signaux de 1 à 9 T (*Tone*) : tonalité de 1 à 9. Cette cotation est quelque peu empirique, pour le S, l'IARU qui gère les recommandations de l'activité radioamateur, a standardisé la mesure de ces signaux électriques par rapport au niveau reçu en dBm.

Une variation d'un point S correspond à un rapport de 6dB.
En OC, au-dessous de 30MHz, S9 correspond à un niveau d'entrée sur la prise antenne de -73 dBm
Au-dessus de 30MHz en VHF, UHF et hyper, S9 correspond à un niveau de -93dBm.
La mesure devrait se faire avec un détecteur quasi-peak avec une constante de temps d'attaque de 10ms et une constante de temps de décroissance de 500 ms.
Nos S-mètres sont gradués de S1 à S9 puis en dB parfois jusqu'à +60dB.

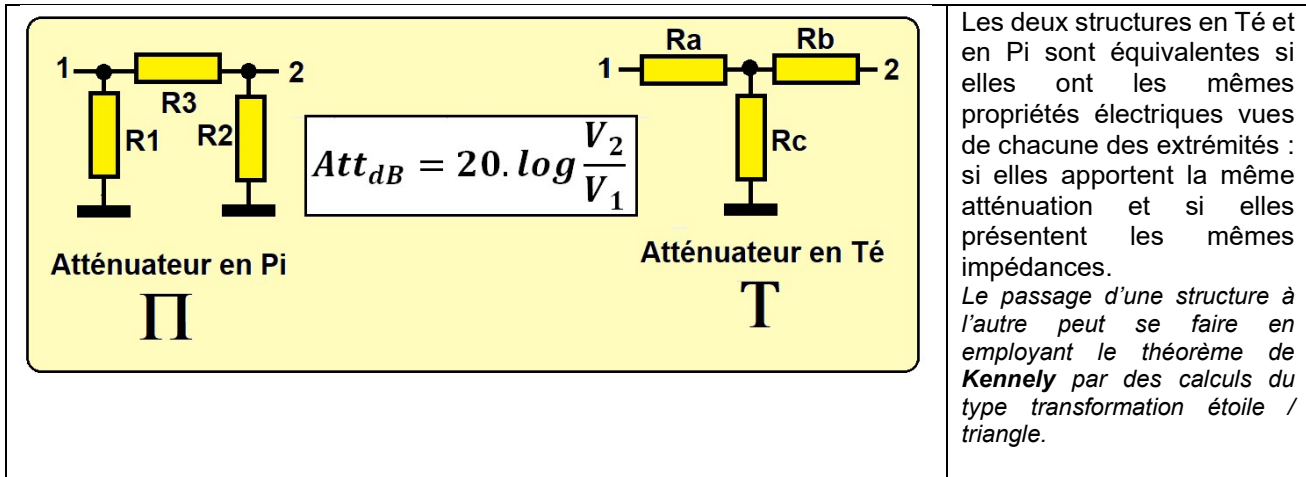


Les circuits électroniques des S-mètres sont rarement réalisés avec des détecteurs quasi-peak et une chaîne d'affichage logarithmique, ils exploitent plus souvent la commande automatique de gain (CAG) du récepteur. Leur indication est peu précise pour les signaux faibles et sature sur les signaux forts, donc rarement réaliste. Les voltmètres sélectifs en fréquence ou même les analyseurs de spectre dotés d'atténuateurs performants permettent des mesures précises du niveau d'antenne. Sur cet appareil, le galvanomètre a une dynamique de 20dB et l'atténuateur d'entrée une dynamique de 120dB.

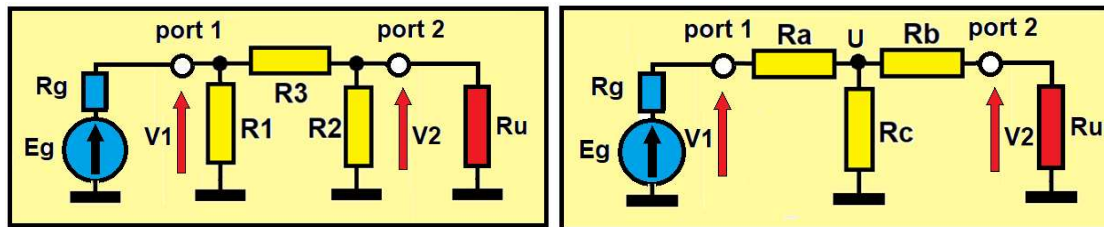
EX15 : Quel est le niveau de puissance en VHF d'un signal entrant sur un récepteur et celui-ci indiquant S1 ?

L'étude du bruit dans un récepteur, du facteur de bruit, du bruit de phase des oscillateurs et de leur effet dans les modulations est un sujet à part et qui méritera toute notre attention.

Les atténuateurs : ils permettent d'atténuer des signaux entre deux étages électroniques comme par exemple diminuer la puissance du signal reçue par une antenne à l'entrée d'un récepteur. Ils ont souvent une structure de quadripôle résistif monté en T ou en Pi, ils dissipent la puissance fournie en excès selon la loi de Joule.



Calcul de l'atténuation : il s'agit de calculer le rapport $A = \frac{V_2}{V_1}$ que l'on exprimera ensuite en dB. Pour le circuit en Pi, le calcul est très simple : $A = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R2 // Ru}{R3 + (R2 // Ru)}$, en utilisant l'opérateur parallèle // bien connu des électriciens : $R2 // Ru = \frac{R2 \cdot Ru}{R2 + Ru}$.

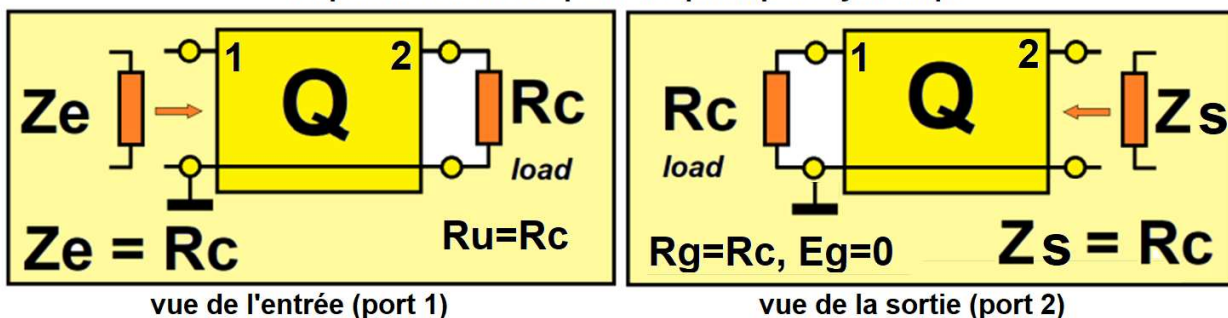


Pour le circuit en Té on aura: $A = \frac{V_2}{V_1} = \frac{Rc // (Rb + Ru)}{Ra + (Rc // (Rb + Ru))} \cdot \frac{Ru}{Rb + Ru}$

L'atténuation est provoquée par la chute de tension des diviseurs potentiométriques (charge présente en sortie). En général les atténuateurs sont utilisés avec une impédance de charge précise qui recevra une partie du signal appliqué en entrée. Cette impédance de charge est souvent l'impédance caractéristique nominale du circuit comme par exemple: 50 ou 75 Ω en haute-fréquence (RF), 600 Ω en audio (AF). Souvent ces atténuateurs sont symétriques, mais ce n'est pas une obligation, ils peuvent être asymétriques et résoudre ainsi en même temps une transformation d'impédance comme par exemple 50 Ω / 75 Ω .

En RF, le respect de l'impédance caractéristique doit être assuré avec la présence ou non de l'atténuateur ce qui se traduit par la notion d'impédance itérative de ces quadripôles :

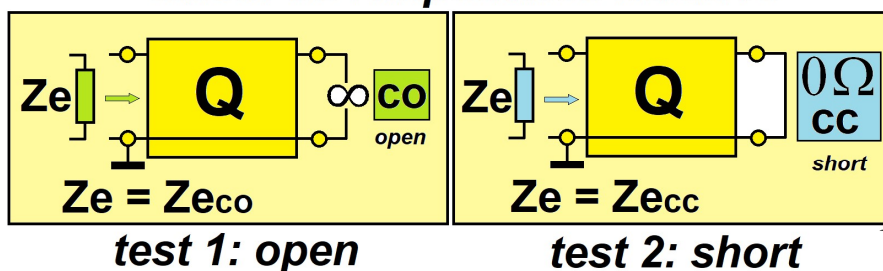
impédance itérative pour un quadripôle symétrique



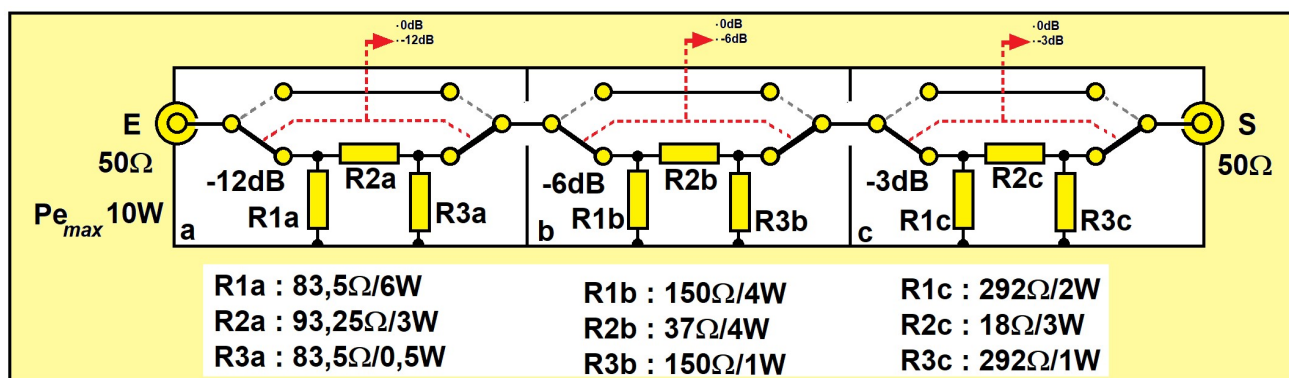
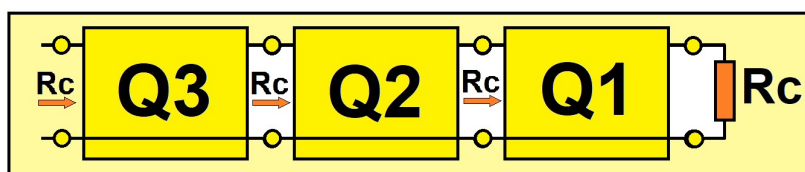
Pour un quadripôle symétrique, l'impédance itérative est telle que l'impédance vue d'un port à travers le quadripôle a la même valeur que la charge branchée à l'autre extrémité à l'autre port.

Le calcul se fait en deux temps, en premier avec l'autre extrémité chargée par un circuit ouvert (CO : *open*) et qui donne la valeur de Z_{eco} , en second avec l'autre extrémité en court-circuit (CC : *short*) et qui donne la valeur de Z_{ecc} . L'impédance itérative ou, ici, l'impédance caractéristique ou plus simplement la résistance caractéristique sera donnée par : $Z_c = R_c = \sqrt{Z_{ecc} \cdot Z_{eco}}$.

calcul de l'impédance itérative



$$Z_c = R_c = \sqrt{Z_{e_{cc}} \cdot Z_{e_{co}}}$$



Ils sont réalisés avec des résistances passives dont la technologie et le câblage doivent être adaptés à la fréquence des signaux (BF, HF, Hyperfréquence). Pour les atténuateurs de forte puissance, il faut dimensionner correctement la dissipation d'énergie de la résistance d'entrée qui encaisse l'essentiel de la puissance éventuellement montées sur un radiateur.

Décibels et antennes radiofréquence.

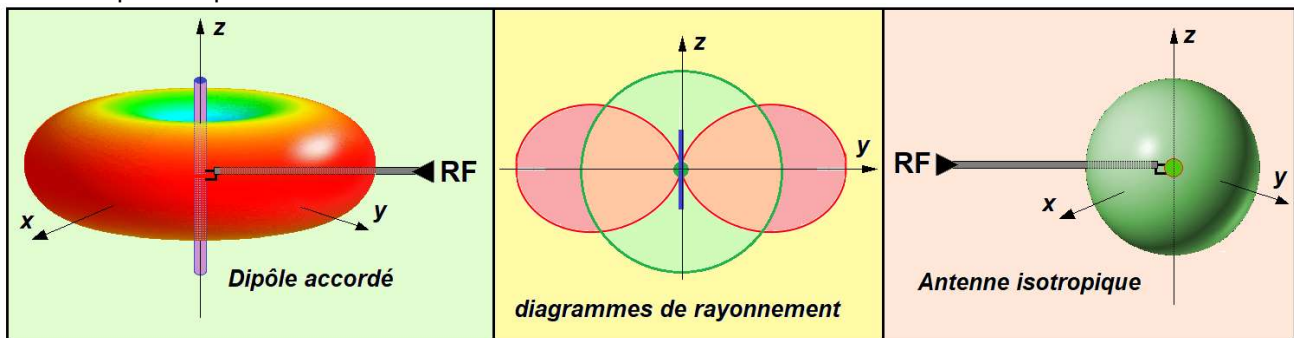
Les antennes isotropiques, doublet, antenne calculable, gain/diagramme de directivité (dBi, dBd).

Les antennes sont essentiellement passives et en conséquence, leurs principales caractéristiques électriques et radioélectriques sont identiques aussi bien en émission qu'en réception. L'impédance d'une antenne correctement accordée en fréquence est une résistance pure, non réactive (ni inductive, ni capacitive). Si le câble d'alimentation (*feeder*) possède la même valeur d'impédance caractéristique que celle de l'antenne, il n'y aura pas d'ondes réfléchies à la connexion ligne et antenne, le ROS (*swr*) sera de 1, toute la puissance incidente sera dissipée par l'antenne. Une antenne n'est jamais parfaite, elle est caractérisée par son rendement et une petite partie de l'énergie reçue est perdue par l'échauffement des conducteurs et des isolants, le reste est rayonné sous forme d'une onde électromagnétique. Les antennes de radio sont plus ou moins directives et elles privilégient une direction particulière de l'espace, à la façon d'un projecteur lumineux, elles concentrent l'énergie dans cette direction et donnent l'illusion d'augmenter la puissance rayonnée, il n'y a pas d'apport de puissance.

Diagramme de rayonnement : Il donne graphiquement la répartition du champ électromagnétique dans l'espace entourant l'antenne, il est donné pour le champ électrique ou le champ magnétique rayonné. Ce

rayonnement est normalement donné en champ lointain et non en champ proche dans une zone où l'onde est formée et qu'elle est pratiquement du type TEM (voir un cours sur les antennes). Les diagrammes de rayonnement sont le plus souvent donné sur des graphes polaires et gradués en décibel.

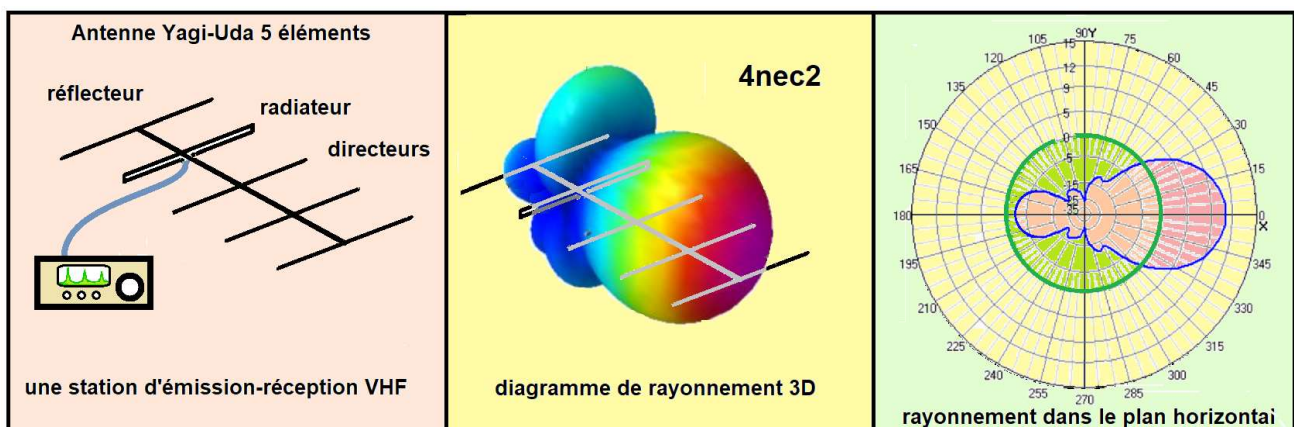
Le gain d'une antenne RF est défini par rapport au rayonnement d'une antenne isotropique, il dépend de son diagramme de rayonnement et de son rendement de conversion. L'antenne de référence serait l'antenne isotropique, qui est telle qu'elle ne privilégie aucune direction et que son rendement serait de 100%. Son diagramme de rayonnement est une sphère en 3D ou bien des cercles en 2D. Une telle antenne n'existe pas pratiquement, il existe des modèles assez proches mais souvent avec un mauvais rendement et difficilement réalisables, l'intérêt d'un tel modèle isotropique sert au calcul des autres antennes et on l'utilise comme référence théorique. Une antenne plus réaliste, de plus calculable et facilement réalisable est le dipôle accordé ou le dipôle raccourci. Le dipôle accordé peut servir aux mesures des performances des autres antennes par comparaison.



Pour une antenne isotropique, la puissance RF émise est répartie uniformément sur la surface d'une sphère, cette antenne pourrait servir de référence pour caractériser une antenne plus directive mais on ne sait pas faire de telles sources rayonnante et en plus ayant un rendement 100% c'est-à-dire sans pertes. On utilise plutôt pour les comparaisons et les mesures l'antenne dipôle accordé dont le rayonnement est calculable, son rayonnement est maximal dans les directions perpendiculaires au dipôle. Dans ces directions, son rayonnement semble plus fort que celui de l'antenne isotropique idéale dans un rapport des puissances apparentes de 1.68, soit en décibel : 2,15 dB.

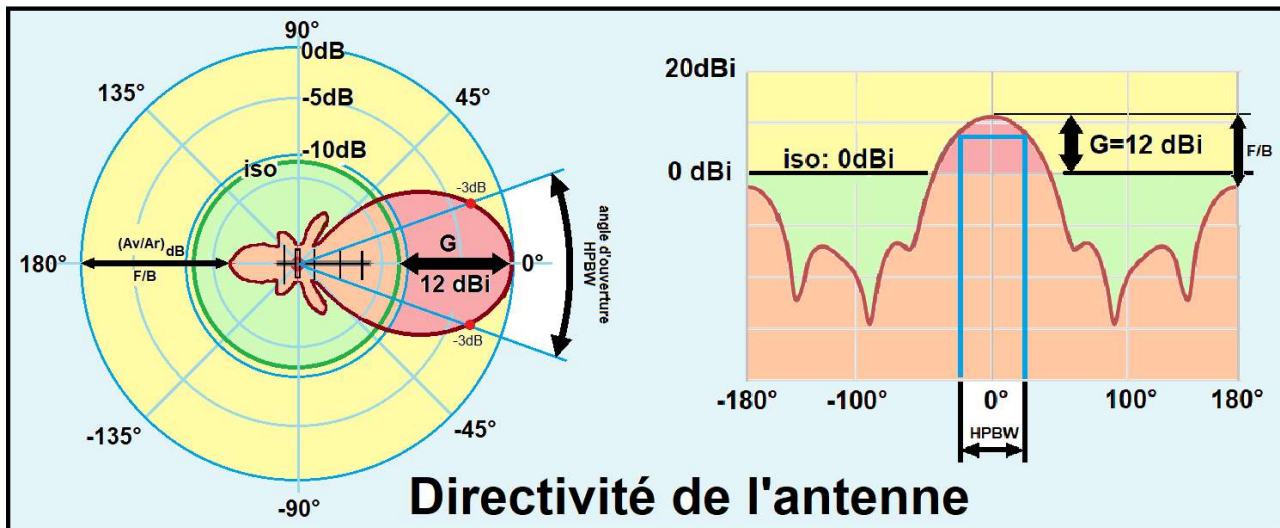
Le gain d'une antenne peut être exprimé en dBi par comparaison à l'antenne isotropique ou en dBd par comparaison aux antennes dipôles accordés, la différence entre les deux unités est donc de 2,15dB avec le plus gros chiffre pour la référence isotropique. Les modélisations numériques et simulations amènent souvent à des résultats en dBi, les mesures comparatives à des résultats en dBd, car les dipôles accordés servent souvent de référence. Il n'y a pas d'intérêt commercial pour un fabricant d'antenne à choisir une unité plus que l'autre comme on peut parfois l'entendre dire !

Les antennes directives comme par exemple l'antenne Yagi-Uda possèdent des diagrammes de rayonnement plus compliqués et qui peuvent dépendre des objets environnants, de la proximité des câbles, de la présence du sol. Ces diagrammes de rayonnement sont actuellement assez facilement simulables ou calculables avec des logiciels de calcul performants (NEC, Matlab, ...).



Le diagramme de rayonnement de l'antenne yagi à cinq éléments utilisée en polarisation horizontales possède un lobe principal qui définit la direction principale, des lobes secondaires plus ou moins parasites un

lobe arrière. Ce diagramme est donné en coordonnées polaires et parfois rectangulaires. Ils sont gradués en décibel avec pour centre un niveau très faible devant le plus grand cercle, par exemple de -40dB.

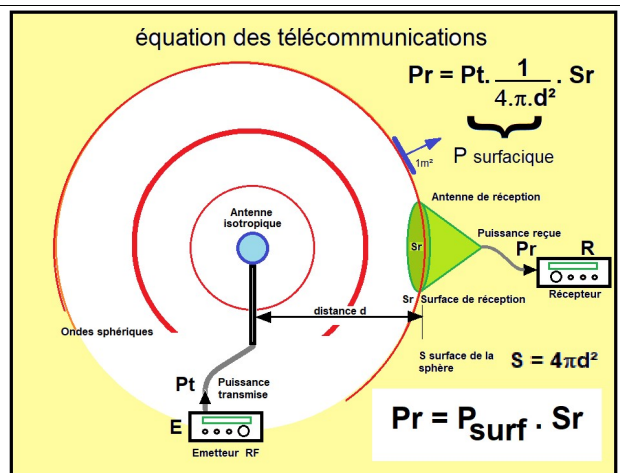


Le diagramme de rayonnement peut être gradué en linéaire ou en graduation logarithmique avec les dBi, les dBd ou les dB relatifs comme ci-dessus. Gradué en dB, il permet de lire directement des informations utiles tel que le gain, l'angle d'ouverture, le rapport avant/arrière, la position des lobes secondaires et la position des zéros de transmission.

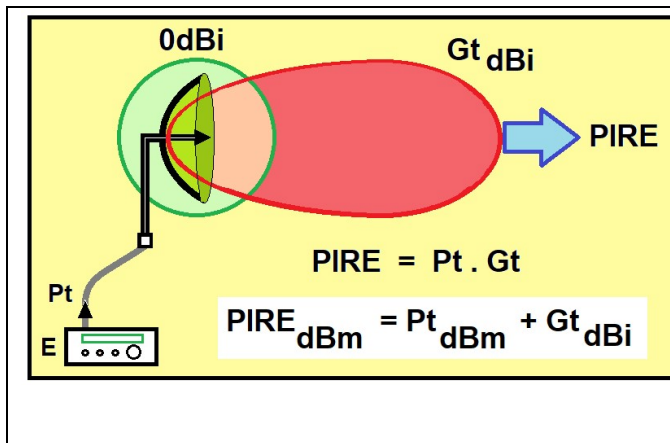
L'équation des télécommunications.

Considérons une antenne isotropique alimentée par un émetteur qui lui fournit une onde pure non modulée de puissance P_t . Les ondes sont sphériques et la puissance est répartie uniformément. Connaissant la surface d'une sphère de rayon d , on connaît la puissance surfacique (en W/m^2) à cette distance et donc la puissance reçue par une antenne de surface donnée. La décroissance du niveau reçu varie selon le carré de la distance (en $1/d^2$) et correspond à l'atténuation d'espace. On suppose, ici, qu'il n'y a aucune autre cause de pertes ou d'atténuation liées à l'atmosphère ce qui n'est pas vrai à certaines fréquences comme par exemple la vapeur d'eau qui absorbe les hyperfréquences.

$$P_r = P_t \cdot \frac{1}{4\pi d^2} \cdot S_r$$



Puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) appelée aussi puissance apparente (PAR)



Une antenne directive concentre l'énergie dans une direction. Elle donne l'effet d'une augmentation de l'illumination qui serait effective avec une antenne isotropique pour laquelle une augmentation de la puissance aurait été nécessaire pour avoir la même illumination. La puissance qu'il faudrait mettre en œuvre, s'appelle la puissance PIRE qui est donc égale à la puissance transmise multipliée par le gain de l'antenne.

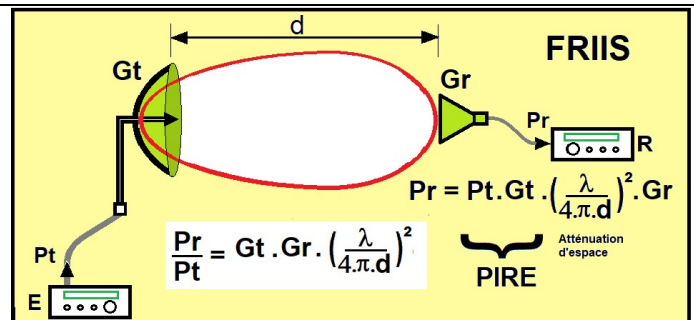
$$PIRE = P_t \cdot G_t$$

$$PIRE_{dBm} = P_{t_{dBm}} + G_{t_{dB}}$$

L'équation de FRIIS: elle permet de faire le bilan de liaison entre un émetteur et un récepteur en espace libre et ici, pour l'équation simplifiée, dans des conditions parfaites de transmission.

La puissance reçue dépend de la puissance PIRE de l'émetteur, de l'atténuation d'espace due à la distance et du gain de l'antenne de réception. : $P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ avec } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

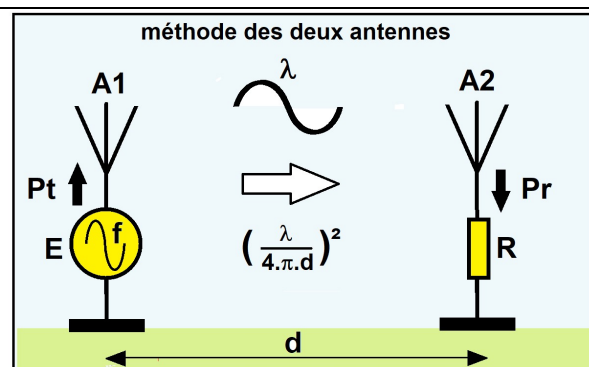


Pour compléter cette équation, il faudrait tenir compte des atténuations dans les feeders des deux antennes, des désadaptations entre les feeders et les charges en extrémités de ceux-ci, du désappointement dans l'orientation des polarisations des deux antennes : $|\vec{U} \cdot \vec{V}|^2$. Il faudrait aussi tenir compte des pertes supplémentaires dans l'espace libre comme l'atténuation à certaines fréquences provoquée par l'absorption de certaines molécules ainsi que de l'effet des trajets multiples ou l'effet rotatoire de Faraday.

Mesures par comparaison des antennes : méthode des deux antennes puis des trois antennes
La distance est toujours choisie pour être en champ lointain (onde formée type TEM).

On dispose de deux antennes, une comme étalon (A1) dont on connaît le gain et une à mesurer (A2). L'antenne A1 émet une fréquence porteuse, l'autre est montée en réception. On applique directement la formule de FRIIS : $G_2 = \frac{P_r}{P_t \cdot G_1 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2}$.

On constate qu'il faut connaître avec une bonne précision la distance entre les deux antennes, la puissance transmise et la longueur d'onde. La méthode suivante est plus précise.



méthode des trois antennes

$$G_2 = \frac{P_2}{P_1} \cdot G_1$$

On dispose de trois antennes, une antenne étalon (A1), une antenne à mesurer (A2) et une troisième antenne émettrice. Il faut respecter impérativement $d_1 = d_2$ et être dans les mêmes conditions d'illumination pour A1 et A2.

On montre que : $G_2 = \frac{P_2}{P_1} \cdot G_1$,

L'antenne A3 doit émettre mais ses caractéristiques sont quelconques, la puissance transmise est quelconque, la longueur d'onde n'intervient pas, les distances doivent seulement être identiques, on peut substituer alternativement les emplacements.

EX 14: A partir des équations de FRIIS concernant A3 et A1 puis A3 et A2 retrouvez la relation $G_2 = \frac{P_2}{P_1} \cdot G_1$

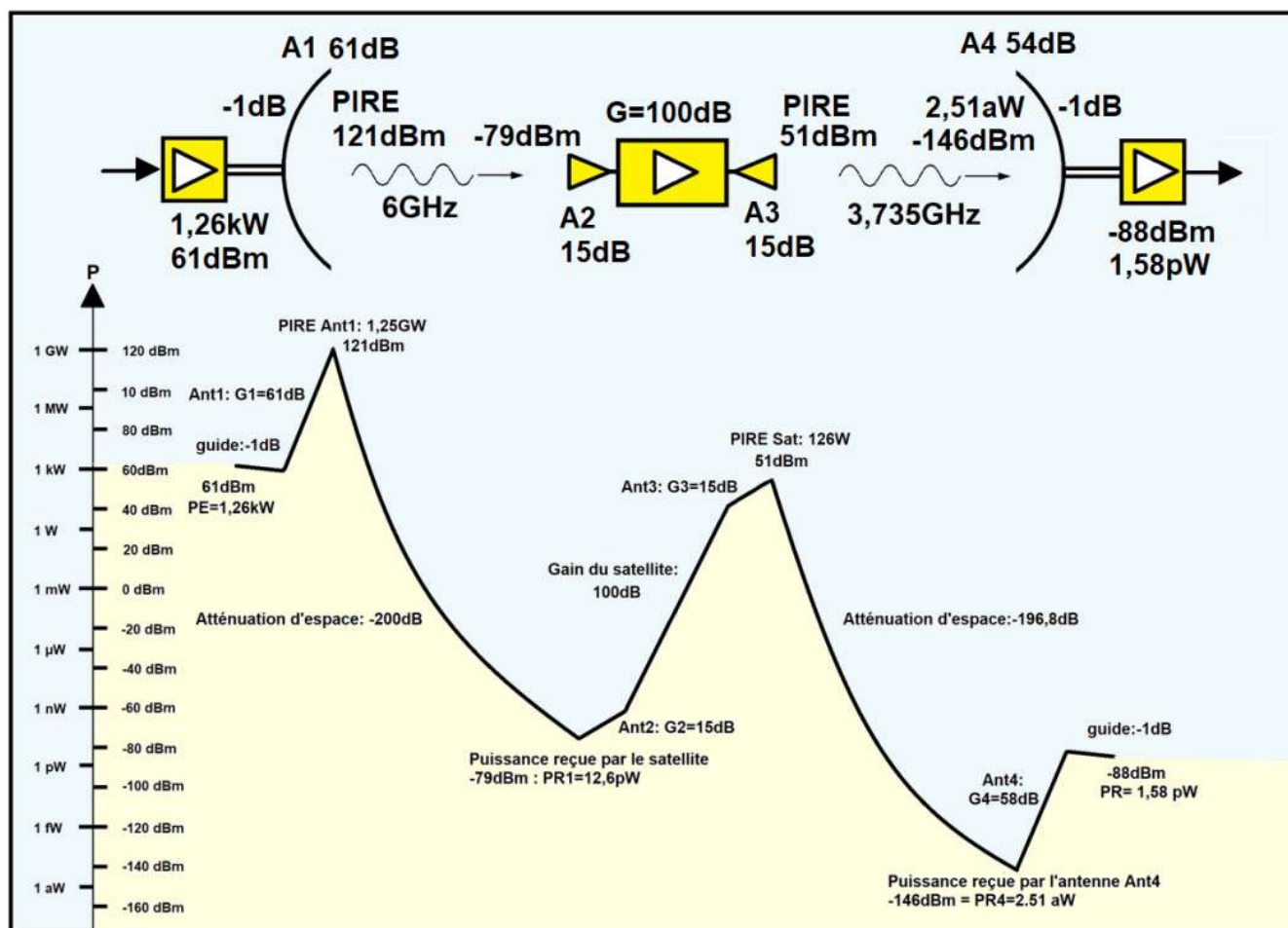
Note : si on dispose d'un bon récepteur de radio utilisable en voltmètre sélectif ou ayant un S-mètre précis et bien calibré, ou bien d'un analyseur de spectre et d'un commutateur manuel d'antenne on peut comparer par le même principe deux antennes avec une station émettrice étalon du type balise par exemple et évaluer le gain relatif entre les deux antennes, c'est pratiquement la même méthode de mesure.

Calcul d'un bilan de liaison : Le calcul sera très fortement simplifié avec l'emploi des décibels et d'un graphique. L'exemple qui suit provient d'informations, de documents et d'exemples concrets provenant du centre de télécommunications spatiales de Bercenay en Othe dans l'Aube.

Le trafic haut débit pour les télécommunications, les services, le trafic Internet et la télévision est transmis par une station terrienne à un satellite géostationnaire se situant à une distance voisine de 41000 km. Le satellite est un transpondeur qui reçoit un signal faible de la terre et le retransmet à une autre station terrestre à une fréquence différente. La première station peut utiliser des puissances de transmission importante et des antennes de grand diamètre ayant donc un très grand gain. La puissance PIRE sera très forte. Le satellite ne peut pas disposer des mêmes performances et la seconde station terrestre qui peut être un particulier peut posséder des performances très modestes.

Le satellite est un transpondeur de fréquence comme peut l'être une station de relais de radioamateur, le schéma simplifié est donné sur cette figure. Les étages d'entrée doivent avoir un très faible facteur de bruit pour ne pas dégrader les signaux. L'ensemble réception et transmission possède un gain voisin de 100dB.

Le graphe suivant donne le bilan de liaison dans le cas de notre exemple. On constate que la puissance PIRE de la station émettrice est énorme : 1,25GW et que la puissance reçue par la seconde station est extrêmement faible : 2,51 aW.



Nous n'irons pas plus loin dans cette présentation des décibels, c'est maintenant un outil que nous avons sous la main et dont nous maîtrisons correctement son emploi. Nous savons que la manipulation des valeurs en dB est souvent délicate, parfois trompeuse et même perfide à cause de la compression des grandes valeurs et l'expansion des petites mais, nous sommes maintenant avertis

<https://www.actutem.com/notice-dbcalc/>

www.RFCAFE.com

www.Microwaves101.com

www.RADIO_ELECTRONICS.com

<https://electronique-radioamateur.fr/radio/circuits/resattenuator.php>