



Feuille de formules avec explications

1. Formule pour une sphère

La densité de puissance S est donnée par la formule:

$$S = E \cdot H \quad (\text{I})$$

avec: S = densité de puissance [W/m²]
E = valeur effective de l'intensité de champ électrique [V/m]
H = valeur effective de l'intensité de champ magnétique [A/m]

La relation entre E et H est donnée par:

$$Z_0 = \frac{E}{H} \quad (\text{II})$$

avec: Z₀ = résistance de l'onde de champ en espace libre [Ω]
Z₀ = 120 · π = 377 Ω

La densité de puissance S rayonnée par une sphère de puissance P à la distance r est donnée par:

$$S = \frac{P}{A} = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{III})$$

avec: P = puissance rayonnée [W]
A = surface de la sphère [m²]
r = rayon de la sphère [m]

Avec l'aide des 3 formules, la puissance peut être exprimée comme suit:

$$P = S \cdot A = E \cdot H \cdot A = \frac{E^2}{Z_0} \cdot A = \frac{E^2}{120 \cdot \pi} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{E^2 \cdot r^2}{30} \quad (\text{IV})$$

L'intensité de champ devient:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{r} \quad (\text{V})$$

Comme l'antenne d'émission est admise être isotrope (en forme de point irradiant), le rayon r à la surface de l'enveloppe virtuelle de la sphère est égale à la distance entre l'antenne d'émission et l'endroit où l'intensité de champ doit être indiquée.

2. Elaboration des formules

Ce qui est déterminant pour respecter les valeurs limites pour une station d'amateur est la valeur moyenne (effet thermique) de l'intensité de champ, par intervalles de 6 minutes, aux endroits où des tierces personnes pourraient se tenir (LSM). Cette intensité de champ est donnée par la puissance moyenne d'émission, moins les pertes des câbles et autres, le gain de l'antenne et la distance. En cas de nécessité, on pourra encore considérer le diagramme de rayonnement vertical de l'antenne ainsi que les atténuations dues aux toits en béton et les parois. Pour des raisons de sécurité, la valeur déterminée de rayonnement sera à multiplier par un facteur de réflexion du sol de 1.6.

Les méthodes de calcul se basent sur une étude «Mesures et calculs des immissions des champs électromagnétiques par des émetteurs de radioamateurs» (projet EFAM) lequel a été élaboré avec l'OFEFP et l'assistance de Swisscom (CTBSO-4 du 8 juin 1998).

Définition de la puissance moyenne d'émission P_m

La puissance moyenne d'émission d'un émetteur par intervalles de 6 minutes dépend de la puissance à la sortie de l'émetteur en service continu et du facteur d'utilisation déterminé par le type de modulation et le genre d'activité.

$$P_m = k \cdot P = AF \cdot MF \cdot P \quad (1)$$

avec:

- P_m = Puissance moyenne d'émission en watts
- k = Facteur d'utilisation (duty-factor)
- P = Puissance à la sortie de l'émetteur en watts
- AF = Facteur d'activité
- MF = Facteur de modulation

Dans le but d'avoir un standard de calcul unique, on s'est basé sur la pratique de la US Federal Communication Commission (FCC) qui utilise un intervalle de 6 minutes avec 3 minutes d'émission et 3 de réception (50%), ce qui donne un facteur d'activité AF de 0.5. En plus, il a été admis des puissances moyennes d'émission P_m et des facteurs de modulation MF suivants:

- pour la bande latérale unique (BLU ou SSB): $P_m = 20\%$ ($MF = 0.2$)
- pour la télégraphie (CW): $P_m = 40\%$ ($MF = 0.4$)
- pour la modulation de fréquence (FM, RTTY): $P_m = 100\%$ ($MF = 1.0$)

De ce fait, un émetteur de 100 Watts a une puissance moyenne d'émission en BLU de 10 Watts, 20 Watts en CW et 50 Watts en FM ou RTTY.

Définition de l'atténuation entre la sortie de l'émetteur et l'antenne

Les atténuations dans les câbles se déterminent en multipliant l'atténuation spécifique (dB/m) du câble utilisé par sa longueur. Il faut encore y ajouter les atténuations des connecteurs pour la fréquence utilisée (0.1 dB par connecteur) et des appareils insérés dans le circuit: wattmètre, commutateur, filtre, accordeur d'antenne. L'atténuation se calcule comme suit:

$$a = a_1 + a_2 \quad (2)$$

avec:

- a = total des atténuations en dB
- a_1 = atténuation de câble en dB
- a_2 = autre atténuation en dB

Le facteur du total des atténuations en valeur absolue se calcule à partir du total des atténuations en dB comme suit:

$$A = 10^{\left(\frac{-a}{10}\right)} \quad (3)$$

avec:

A = facteur du total des atténuations

Définition du gain de l'antenne

Le gain de l'antenne en dB_i, comparé à une source ponctuelle, est déterminant pour le calcul de la puissance isotrope rayonnée (EIRP). Ce gain est de 2.15 dB plus élevé que le gain d'un dipôle (dB_d). En cas d'absence de données du constructeur de l'antenne, on admet un gain de 2.15 dB_i pour dipôle demi-longueur d'onde, antenne verticale et boucle magnétique, 6 dB_i pour quads à 2 éléments et 6.5 dB_i pour Yagi à 3 éléments. Ces valeurs sont applicables pour la direction principale de rayonnement de l'antenne. Pour les antennes à forte directivité, on peut tenir compte de l'atténuation directionnelle verticale. Le gain de l'antenne se calcule alors de la façon suivante:

$$g = g_1 - g_2 \quad (4)$$

avec:

g = gain total de l'antenne en dB

g₁ = gain de l'antenne en dB_i

g₂ = atténuation directionnelle verticale en dB

Le facteur du gain total de l'antenne, exprimé en chiffres absolus, se calcule à partir du gain total de l'antenne en dB comme suit:

$$G = 10^{\left(\frac{g}{10}\right)} \quad (5)$$

avec:

G = facteur du gain total de l'antenne

Définition de la puissance d'émission déterminante P_S

La puissance moyenne d'émission P_m, multipliée par le facteur du total des atténuations A, et par le facteur du gain total de l'antenne G, donne la puissance déterminante d'émission (EIRP) dans l'axe de rayonnement maximum.

$$P_S = P_m \cdot A \cdot G \quad (6)$$

avec:

P_S = puissance d'émission déterminante (EIRP) en watts

L'ordonnance RNI prend en considération la puissance d'émission déterminante (ERP) par rapport au dipôle. Du fait que le dipôle a un gain de 2.15 dB correspondant à un facteur de 1.64 comparé à une antenne isotrope, la puissance d'émission déterminante (ERP) doit donc être divisée par ce facteur.

$$P'_S = \frac{P_S}{1.64} \quad (7)$$

avec:

P'_S = puissance d'émission déterminante (ERP) en watts

Définition de l'intensité de champ électrique déterminante au SLM

A partir de la puissance d'émission déterminante, on peut calculer, avec la formule de champ lointain (formule isotrope), l'intensité moyenne du champ électrique E sur la distance d comprise entre l'antenne et le LSM (LSM = lieu de séjour momentané). A l'exception de l'antenne long fil et du dipôle filaire pour les bandes à ondes courtes inférieures, on choisit le point d'alimentation comme point de référence pour la distance. Pour l'antenne long fil et le dipôle filaire on prend le point de l'antenne le plus proche d'un LSM. Dans certains cas, on pourra prendre en considération le facteur d'amortissement par le bâtiment, pour autant que les habitants ne puissent se tenir que derrière les murs. Le facteur d'amortissement par le bâtiment exprimé en chiffres absolus se calcule à partir de l'amortissement par le bâtiment en dB comme suit :

$$A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} \quad (8)$$

avec:

A_G = facteur d'amortissement par le bâtiment

a_G = amortissement par le bâtiment en dB

L'intensité de champ électrique moyenne E à la distance d se calcule d'après la formule suivante:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_S \cdot A_G}}{d} \quad (9)$$

avec:

E = intensité de champ électrique moyenne en volts par mètre

d = distance entre le LSM et l'antenne en mètres

Par des mesures, on a pu déterminer que l'intensité de champ électrique moyenne rapproché était souvent plus élevée que les valeurs données par le calcul. De ce fait, en se basant sur la pratique de la FCC, la formule ci-dessus a été modifiée par l'adjonction du facteur de réflexion du sol $k_r = 1.6$. Les valeurs ainsi mesurées restent sans exception en-dessous des valeurs obtenues par la formule modifiée. Font exception: les boucles magnétiques.

$$E' = k_r \cdot E = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_S \cdot A_G}}{d} \quad (10)$$

avec:

E' = intensité de champ électrique déterminante au LSM en volts par mètre

k_r = facteur de réflexion du sol

Une modification de la puissance par un facteur de 10 augmente ou diminue l'intensité de champ par un facteur de $\sqrt{10}$ ou de 3.2. Ainsi, l'intensité de champ d'une onde porteuse conti-

nue (comme utilisée normalement pour la mesure) est 3.2 fois plus forte que l'intensité de champ générée en BLU (puissance moyenne 10%).

Définition de la distance de sécurité d_s

La distance de sécurité est obtenue à partir de la formule (10) modifiée en remplaçant E' par la valeur limite d'immissions selon ORNI pour la fréquence utilisée.

$$d_s = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{E_{VLI}} \quad (11)$$

avec:

d_s = distance de sécurité en mètre.

E_{VLI} = valeur limite d'immissions de l'intensité de champ électrique en volts par mètre selon ORNI.

3. Exemple de calcul pour une installation supposée émettant sur 7 MHz

Admettons: Un émetteur avec une puissance de sortie de 100 Watts émet en CW et BLU (facteur de modulation MF=0.4 pour la CW). Entre l'émetteur et l'antenne, il y a 15 m de câble coaxial RG213 et 3 m de RG58. Il y a encore l'atténuation de 4 connecteurs de câble et d'un accordeur d'antenne. L'antenne utilisée est une Fritzel FB34. La distance entre la limite de propriété et le point d'alimentation de l'antenne (Yagi) est de 12.5 mètres.

Puissance moyenne d'émission: $P_m = AF \cdot MF \cdot P = 0.5 \cdot 0.4 \cdot 100 = 20.0 \text{ W}$

Atténuation par 15 m de câble RG213 (atténuation de 1.4 dB par 100 m à 7 MHz) et 3 m de câble RG58 (atténuation de 3.9 dB par 100 m à 7 MHz): $a_1 = 15 \cdot \frac{1.4}{100} + 3 \cdot \frac{3.9}{100} = 0.33 \text{ dB}$

Atténuation par l'accordeur d'antenne (0.2 dB) et 4 connecteurs (0.4 dB): $a_2 = 0.6 \text{ dB}$

Total des atténuations: $a = a_1 + a_2 = 0.33 + 0.6 = 0.93 \text{ dB}$

Facteur du total des atténuations: $A = 10^{\left(\frac{-a}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0.93}{10}\right)} = 0.807$

Gain de l'antenne Fritzel FB34 à 7 MHz: $g_1 = 2.15 \text{ dB}_i$

Atténuation directionnelle verticale: pas prise en considération: $g_2 = 0 \text{ dB}$

Gain total de l'antenne: $g = g_1 - g_2 = 2.15 - 0 = 2.15 \text{ dB}$

Facteur du gain total de l'antenne: $G = 10^{\left(\frac{g}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{2.15}{10}\right)} = 1.641$

Puissance déterminante de l'émission (EIRP): $P_s = P_m \cdot A \cdot G = 20 \cdot 0.807 \cdot 1.641 = 26.49 \text{ W}$

Puissance déterminante de l'émission (ERP): $P'_s = P_s / 1.64 = 16.15 \text{ W}$

Amortissement par le bâtiment: pas considéré: $a_G = 0 \text{ dB}$

Facteur d'amortissement par le bâtiment: $A_G = 10^{\left(\frac{-a_G}{10}\right)} = 10^{\left(\frac{-0}{10}\right)} = 1.0$

L'intensité de champ dans l'intervalle de 6 minutes à une distance entre le LSM et l'antenne de 12.5 mètres devient:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{d} = \frac{\sqrt{30 \cdot 26.49 \cdot 1.0}}{12.5} = 2.26 \text{ V/m}$$

L'intensité de champ corrigée dans l'intervalle de 6 minutes à une distance du LSM à l'antenne de 12.5 mètres devient:

$$E' = k_r \cdot E = 1.6 \cdot 2.26 = 3.61 \text{ V/m}$$

Dans le cas d'une valeur limite d'immissions (VLI) de 32.4 V/m (pour la fréquence de 7 MHz), la distance de sécurité doit être de:

$$d_s = \frac{k_r \cdot \sqrt{30 \cdot P_s \cdot A_G}}{E_{VLI}} = \frac{1.6 \cdot \sqrt{30 \cdot 26.49 \cdot 1.0}}{32.4} = 1.39 \text{ m}$$