

Etude du risque des rayonnements EM pour la santé appliquée au spectre UHF et hyperfréquence

Matthieu CABELLIC – F4BUC

L'état de l'art des performances des stations hyper portables ou fixes dans le domaine amateur montre bien la montée progressive en puissance. Aujourd'hui il n'est plus rare de posséder 10 ou 20W sur 10 GHz et quelques W sur 24 GHz. Le gain des paraboles, lui, ne change pas. Du coup la PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente) de nos stations augmente d'année en année.

Cela ne va donc pas sans poser sérieusement la question du risque des rayonnements électromagnétiques sur la santé.

Cet article a pour but de présenter la nature du risque et la façon de le calculer, le quantifier pour mieux le comprendre.

Présentation de la nature du risque et de sa phénoménologie

Nous-nous intéressons aux effets des rayonnements haute fréquence.

Ces longueurs d'ondes qui nous intéressent sont très supérieures aux longueurs d'ondes optiques, laser, rayons X etc., et de ce fait sont souvent appelées « rayonnements non ionisants ». Cela signifie que les rayonnements à ces longueurs d'ondes n'ont pas l'énergie suffisante pour risquer de dégrader les molécules d'ADN des cellules.

Le mécanisme d'interaction le mieux connu est celui des effets thermiques. Au-delà d'une certaine puissance, les ondes radiofréquences provoquent un échauffement des tissus. D'autres effets dits « non thermiques » ou « spécifiques » résultent d'autres interactions biophysiques des ondes avec la matière. Ces phénomènes sont moins bien connus et font l'objet de nombreuses études.

L'exposition du corps humain aux champs électriques ou magnétiques basses fréquences n'entraîne généralement qu'une absorption d'énergie négligeable et aucune élévation de température mesurable.

L'exposition à des champs électromagnétiques de fréquence supérieure à 100 kHz peut entraîner une absorption d'énergie et une élévation de température significatives. L'exposition à ces champs électromagnétiques entraîne un dépôt et une distribution d'énergie fortement inhomogènes à l'intérieur du corps. Ce dépôt et cette distribution ne peuvent être évalués que par dosimétrie et par calcul.

En ce qui concerne l'absorption d'énergie par le corps humain, les champs électromagnétiques peuvent être classés en quatre gammes de fréquences :

- fréquences comprises entre 100 kHz environ et moins de 20 MHz, auxquelles l'absorption dans le tronc décroît rapidement avec la fréquence tandis qu'une absorption significative peut se produire au niveau du cou et des jambes
- fréquences comprises entre 20 MHz environ et 300 MHz, auxquelles une absorption relativement importante peut se produire dans l'ensemble du corps ; cette absorption peut même être plus forte si l'on prend en compte les résonances dans certaines parties du corps (tête, par exemple)
- fréquences comprises entre 300 MHz et plusieurs GHz, auxquelles se produit une absorption locale inhomogène importante

- fréquences supérieures à 10 GHz environ, auxquelles l'absorption d'énergie se produit principalement à la surface du corps (la profondeur de pénétration du champ dans les tissus est faible)

Pour les hyperfréquences, la densité de puissance incidente du champ (en W/m²) constitue la grandeur la plus appropriée pour l'évaluation de l'énergie absorbée.

Limites des normes d'exposition

Des limites ont été établies par l'ICNIRP (Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants). Cette commission est chargée d'étudier les risques potentiels liés aux différents types de rayonnements non ionisants, d'élaborer des guides internationaux pour l'établissement de limites d'exposition et de traiter de tous les aspects de la protection contre ces rayonnements. Le standard de l'ICNIRP est utilisé par la majorité des pays européens.

Les limites sont applicables à deux catégories de personnes : les travailleurs (exposition occasionnelle) et le grand public (exposition permanente).

Seuls les effets avérés ont été retenus comme fondements pour les valeurs limites d'exposition proposées. Ces limites ne sont fondées que sur des effets immédiats sur la santé, tels que la stimulation des muscles ou des nerfs périphériques, les brûlures provoqués par l'élévation de température des tissus sous l'effet de l'absorption d'énergie.

Les limites sont données jusqu'à 300 GHz. Ce sont les valeurs de la densité surfacique de puissance, en valeurs RMS (ou valeur moyenne).

Une dissociation est faite entre les champ E et le champ H (composante électrique et magnétique du champ) en gamme HF puisque la limite d'exposition à ces fréquences est basée plus sur des phénomènes d'électro-stimulation que des phénomènes thermiques.

**International Council on Non-Ionizing
Radiation Protection (ICNIRP)**

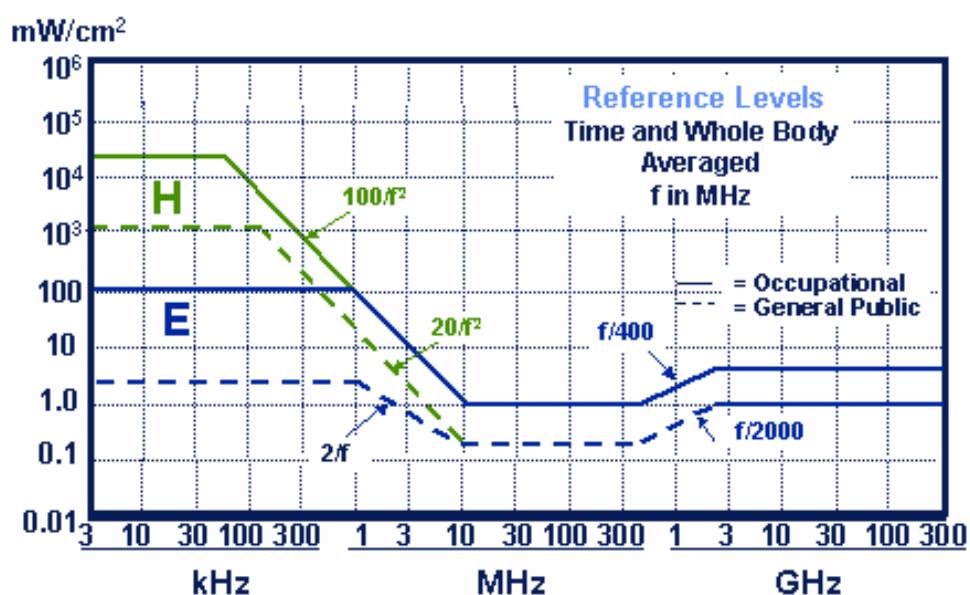


Figure 1 : Limites normatives de rayonnement

Gamme de fréquences	Champ Electrique (E) (V/m)	Champ magnétique (H) (A/m)	Densité de puissance surfacique (S) (mW/cm ²) ¹
<1 Hz	—	3.2×10^4	—
1 - 8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4/f^2$	—
8 - 25 Hz	10,000	$4000/f$	—
0.025 - 0.8 kHz	$250/f$	$4/f$	—
0.8 - 3 kHz	$250/f$	5	—
3 -150 kHz	87	5	2.0; 995
0.15 - 1 MHz	87	$0.73/f$	2.0; $20/f^2$
1 - 10	$87/f^{1/2}$	$0.73/f$	$2.0/f; 20/f^2$
10 - 400 MHz	28	0.073	0.2
400 - 2,000 MHz	$1.375f^{1/2}$	$0.0037f^{1/2}$	$f/2000$
2 - 300 GHz	61	0.16	1.0

Il est intéressant de constater que les limites d'exposition les plus contraignantes concernent le segment VHF entre 30 et 300 MHz. Dans cette région, les tissus du corps humain absorbent la majorité de l'énergie RF se traduisant par une élévation de chaleur. Les organes les plus vulnérables sont les yeux (possibilité de contracter une cataracte) et les organes reproducteurs. Ces organes ont la plus faible tolérance à l'échauffement et une faible capacité à dissiper l'énergie calorifique.

Aux fréquences plus basses, la majorité de l'énergie RF passe à travers les tissus et ne sont pas absorbés. Aux fréquences plus hautes, le rayonnement est réfléchi à la surface de la peau. Ainsi au dessus de 1,5 GHz la limite d'exposition est 5 fois plus importante que dans la région 30 – 300 MHz.

Nous voyons donc que la gamme VHF est en fait la plus dangereuse en terme d'exposition aux champs EM.

Pour nos évaluations de risque correspondant à nos activités amateurs nous devons considérer la limite correspondant au grand public (« General public »).

Etude de cas : risque pour une station hyperfréquence portable

Nous allons dérouler les calculs étape par étape afin de bien faire comprendre le principe général pour permettre ensuite à chacun d'évaluer les niveaux d'expositions appliqués à son cas.

Soit le cas suivant :

- Parabole de 1m de diamètre
- 24 GHz, 5W crête
- (C'est déjà une belle station en 2007 !)

¹ Multiplier par 10 pour obtenir des W/m²

Nous utilisons la limite « General public ». D'après cette limite il ne faut pas dépasser 1mW/cm² soit 10 W/m² à 24 GHz.

Nous considérons une puissance crête de 5W. En BLU nous considérons que la puissance moyenne est de 1/3 inférieure soit $5/3 = 1,7$ W. En effet, c'est la puissance moyenne qui compte. Avec un peu de marge, prenons 2W. Ce chiffre est aussi valable pour une émission en CW.

Une parabole de 1m de diamètre à 24 GHz présente un gain de 45 dBi (en prenant un rendement de 50%). Cela fait donc une PIRE (Puissance Isotrope Rayonnée Équivalente) de 63 KW.

Pour calculer la densité surfacique de puissance, il suffit de considérer que cette PIRE est rayonnée par une antenne isotrope (c'est du reste la définition de la PIRE) située à une distance d.

La densité surfacique est donc : $S = \text{PIRE} / (4 * \pi * d^2) \approx 5000 / d^2$

Ainsi nous pouvons en déduire la distance de « sécurité » d_{\min} afin de ne pas dépasser la limite de 10 W/m². Cela nous donne 22 mètres.

Oui mais... ce calcul n'est valable qu'en champ lointain et il ne prend pas en compte la formation du champ proche devant la parabole. Nous devons corriger nos calculs en tenant compte de la distribution du champ proche. En effet la zone de champs proche n'est pas négligeable du tout dans notre cas de figure, et c'est le cas général à toutes les autres fréquences UHF et hyper.

Pour rappel, la zone de champs proche est la zone devant l'antenne où le champ n'est pas encore entièrement formé.

Champ proche dans l'axe

La surface parabolique de l'antenne a pour but de transformer le front d'onde sphérique de la source en un front d'onde plan (onde plane). La collimation se réalise progressivement le long de la zone de champ proche. Ainsi lorsque l'on se rapproche du réflecteur la collimation est de moins en moins réalisée et le gain de l'antenne diminue et le diagramme de rayonnement s'élargit.

D'un autre côté, la perte en espace libre diminue au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'antenne.

En fin de compte la densité surfacique du champ diminue moins vite lorsque l'on se rapproche en étant près de l'antenne que si l'on s'en rapprochait en étant loin de l'antenne.

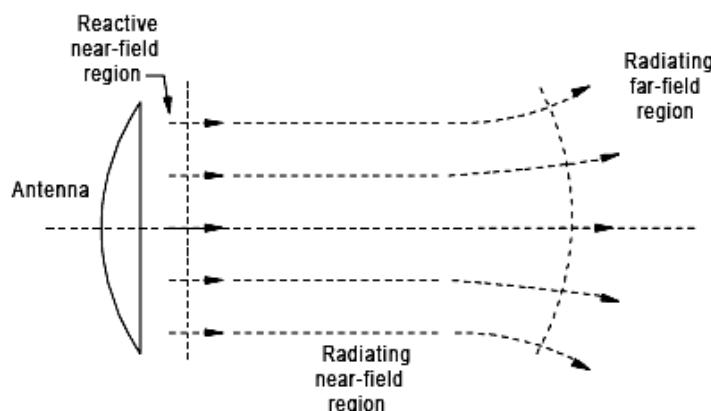


Figure 2 : Zones de champ proche / champ lointain

En fait, au fur et à mesure que vous vous rapprochez de l'antenne, il se passe deux choses :

- l'atténuation d'espace libre décroît
- le gain apparent de l'antenne décroît parce que des portions du réflecteur deviennent en opposition de phase

L'expérience montre que la densité de puissance ne dépasse jamais plus de 15dB (ou un rapport x32) de ce quelle est en limite de champ proche et ne dépasse jamais la densité surfacique de puissance dans l'axe du réflecteur.

Il est classique de dire que la limite de zone de champ proche est de $2.D^2/\lambda$

Une valeur plus réaliste est de $0.5.D^2/\lambda$ comme le montrent les courbes qui suivent (figure 3).

Sur cette figure, la courbe A sert de référence seulement et montre comment la densité de puissance surfacique évoluerait si nous appliquions la formule de propagation en champ lointain (en $1/R^2$).

La courbe B montre la variation de la puissance surfacique dans l'axe d'une antenne à ouverture avec une loi d'illumination en cosinus, typique d'un cornet dans le plan H.

La courbe C montre la variation de puissance surfacique pour une loi d'illumination uniforme, typique d'un cornet dans le plan E.

La courbe D montre la variation de puissance surfacique pour une loi d'illumination apodisée sur les bords, c'est à dire décroissante par rapport au centre du réflecteur. En général l'illumination sur les bords est de -10 dB typiquement pour une parabole.

Le point F montre la transition champ proche / lointain. Au delà de ce point la loi de décroissance du champ en fonction de l'éloignement est la même pour tout type d'antenne.

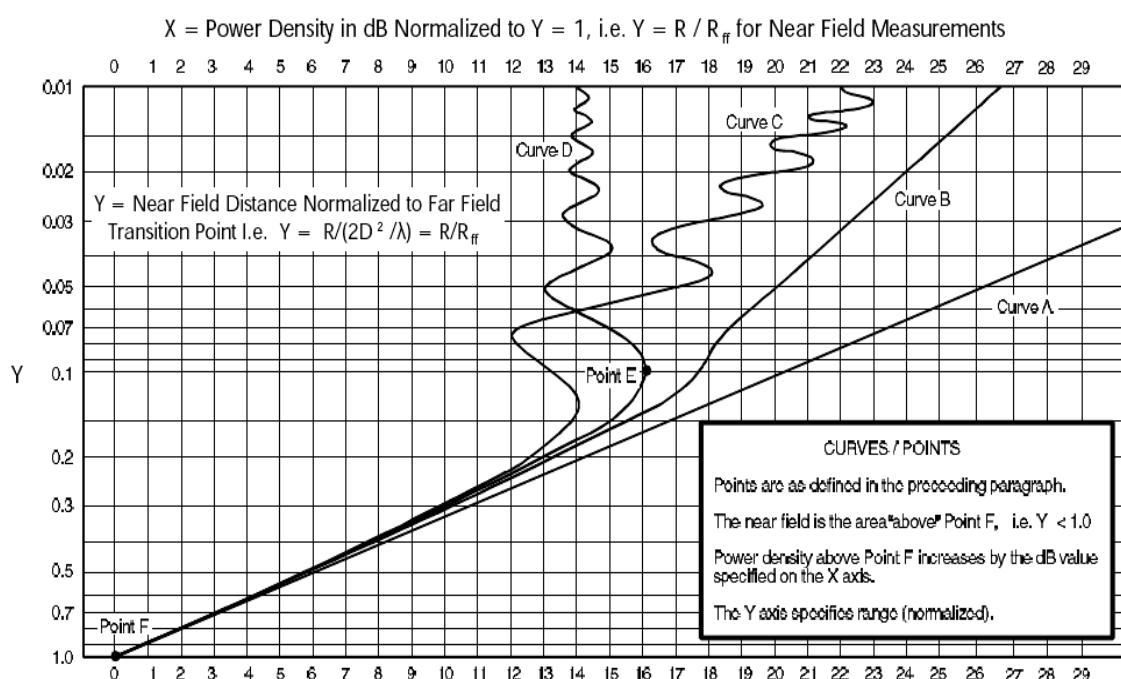


Figure 4 - Antenna Near-Field On-Axis Power Density (Normalized)
For Various Aperture Illuminations

Figure 3 : Evolution de la densité de puissance surfacique en champ proche pour une antenne à réflecteur et différentes lois d'illumination

Les courbes qui sont pertinentes pour notre étude de cas sont celles correspondant à une illumination de type D.

La figure suivant est le gain apparent correspondant de l'antenne.

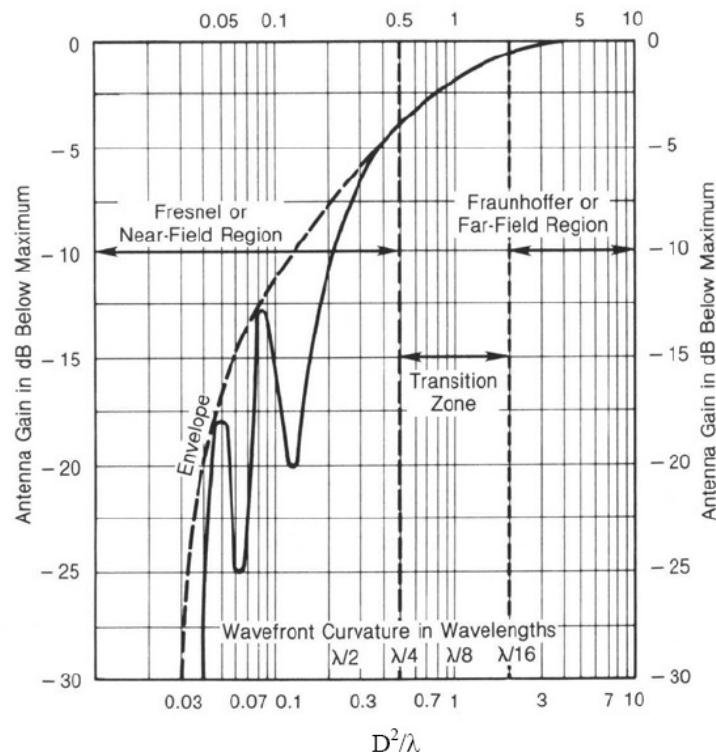


Figure 4 : Variation du gain apparent de l'antenne dans la zone de champ proche

En réalisant la différence avec la loi de champ lointain, nous obtenons le gabarit suivant (qui est l'enveloppe de la courbe D précédente).

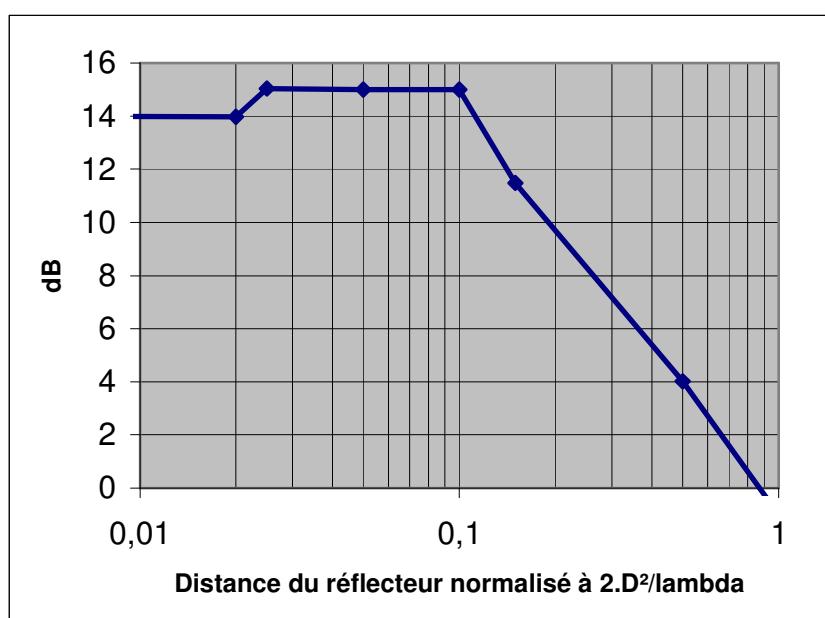


Figure 5 : Gabarit d'augmentation de la densité surfacique de puissance dans l'axe de la parabole relativement à la frontière de champ proche / lointain

Reprenez donc nos calculs appliqués à notre cas en utilisant ce gabarit et regardons ce qui se passe en proximité de l'antenne.

Le champ lointain de notre parabole commence à $2*D^2/\lambda = 160$ mètres.

A cette distance le faisceau est bien collimaté et la PIRE est réellement de 63 KW (calcul précédent). A 160 m la densité surfacique de puissance est $63000/(4*\pi*160^2) = 0.2 \text{ W/m}^2$. Maintenant si nous nous rapprochons de l'antenne, dans la zone de champ proche, la densité de puissance n'augmenterait pas de plus de 15 dB et atteindrait un pic à une distance comprise entre 1/5 et 1/25 de la frontière de zone de champ proche soit entre 32 mètres et 6 mètres, puis continuerait à osciller entre deux niveaux qui sont à quelques dB de différence.

Ainsi dans notre cas la densité surfacique en champs proche est maximale avec un niveau de $0.2 * 32 = 6.4 \text{ W/m}^2$. Cette valeur est inférieure à la limite d'exposition de 10W/m^2 .

Champ proche à proximité immédiate

Et maintenant, pour les curieux qui se positionneraient juste devant le réflecteur (par exemple pour admirer en détail votre super source quadri-bande corrugée multi-mode), que risquent-ils si en même temps vous passez en émission ?

Une parabole de 1m de diamètre a une surface de $\pi * 0.5^2 = 0.8 \text{ m}^2$.

En supposant un rendement d'éclairage (grâce à votre super source) de 60% cela fait une densité surfacique moyenne sur toute l'ouverture du réflecteur de $2\text{W}/0.8\text{m}^2 = 2.5 \text{ W/m}^2$. A cause de l'apodisation de 10dB sur les bords, la densité de puissance est plus importante au centre de l'ouverture du réflecteur, de l'ordre de quatre fois plus importante que la densité moyenne soit $4* 2.5 = 10 \text{ W/m}^2$. Tout juste pour la limite mais OK.

Les curieux en question ne courront donc pas de danger, mais par précaution il vaut mieux que l'admiration (ou l'adoration selon les cas) ne dure pas trop longtemps (quelques minutes maximum).

En fait nous voyons que dans ce cas, à puissance d'émission égale, plus la surface du réflecteur est grande, moins il y a de risque d'exposition à proximité immédiate de l'antenne.

Champs proches latéraux

Jusqu'à présent nous avons considéré le rayonnement de puissance dans l'axe du faisceau de l'antenne. Nous avons vu en particulier que le champ proche peut être assez étendu.

Qu'en est-il pour les angles d'observations décalés par rapport à l'axe ?

En fait la limite de champ proche est beaucoup moins étendue et les lobes secondaires se forment beaucoup plus proche que le lobe principal.

Dans notre étude de cas, cette zone de champ proche n'est plus que de quelques mètres et nous pouvons appliquer les valeurs relatives des lobes secondaires du diagramme de rayonnement (mesurés en champ lointain) pour nos calculs sans grande correction.

Il est difficile de donner des formules empiriques pour calculer les limites de champ proche sur les lobes secondaires. Nous-nous référerons aux quelques courbes empiriques de la figure 6.

Ce graphique s'utilise de la façon suivante : d'abord localiser la courbe pleine correspondant au diamètre du réflecteur. Ensuite localiser l'intersection de cette courbe avec la courbe en pointillée correspondant à la fréquence considérée. La partie du graphique à considérer correspond à la portion de la ligne pleine qui s'étend au dessus et à gauche de ce point

d'intersection. Pour cette portion de courbe, nous avons la relation entre la distance de transition champ proche/champ lointain en fonction de l'angle d'écart par rapport à l'axe du réflecteur.

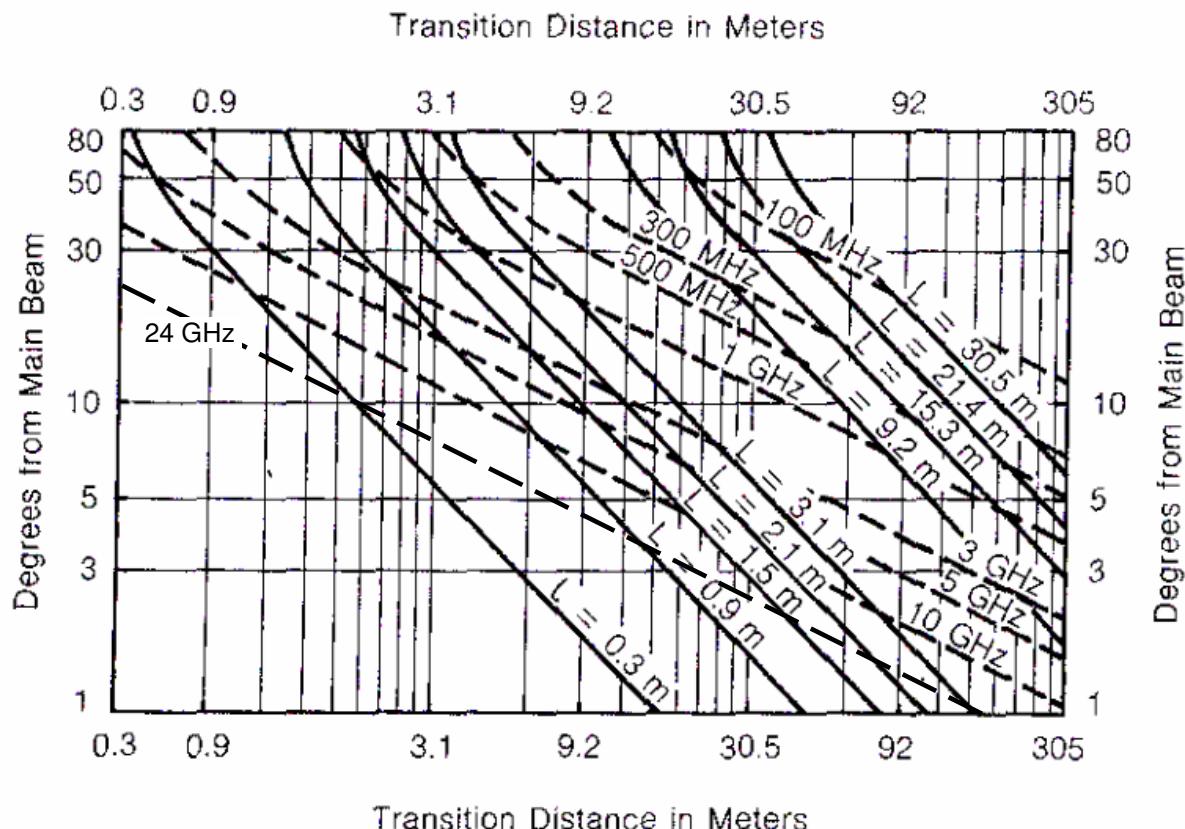
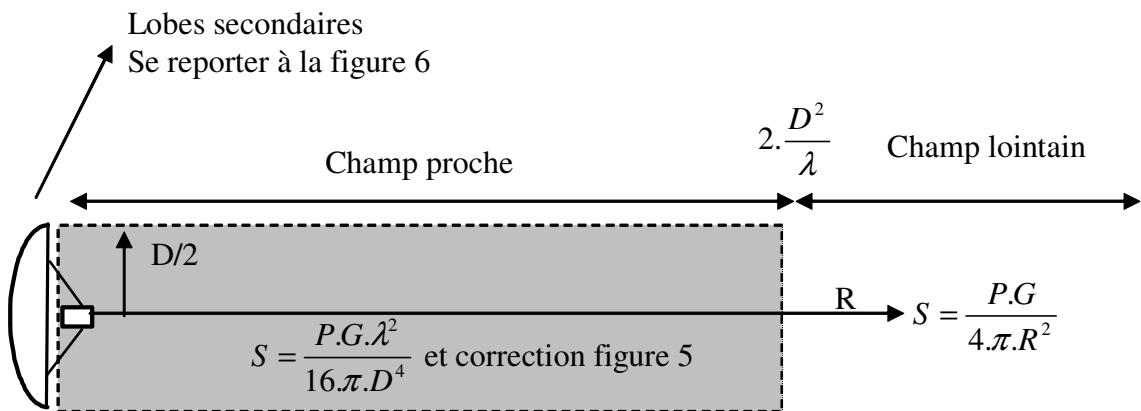


Figure 6 : Courbes empiriques de détermination de la limite de champ proche / lointain sur les lobes secondaires d'une antenne parabolique (L=diamètre antenne)

Ainsi, dans notre exemple (24 GHz et pour 1 m de diamètre) à partir d'un angle de dépointage de 4° , la limite de champ proche ne concerne plus que les lobes secondaires et la transition commence à 15 m. Elle n'est plus que de 3 m à 20° puis de l'ordre de 1 m à 45° .

A ces distances nous pouvons utiliser les valeurs relatives des lobes secondaires en champ lointain. Ces lobes décroissant très vite, la densité de puissance devient alors négligeable.

Enfin, pour terminer voici une figure donnant les règles empiriques facilitant le calcul des densités surfaciques de puissance en champ proche d'une antenne de type parabolique.



D = diamètre du réflecteur (m)

G = gain de l'antenne (exprimé en rapport) champ lointain

S = densité surfacique de puissance (W/m^2)

P = puissance envoyée à l'antenne (W)

λ = longueur d'onde (m)

Figure 7 : Résumé des règles empiriques de calcul des densités de puissance surfacique pour une antenne à réflecteur

Ces calculs sont approchés mais en général suffisant pour se fixer des ordres de grandeur et estimer l'intensité du risque.

Conclusion

Nous venons de montrer par quelques calculs que la course à la puissance de nos stations hyperfréquences portables n'est pas sans poser des questions sur les risques liés aux rayonnements.

Ce risque s'applique en fait non pas à l'opérateur de la station (qui est en général derrière le faisceau de l'antenne) mais surtout aux personnes environnantes pouvant se situer à proximité. Le risque doit être analysé pour les stations portables car l'antenne, et donc le faisceau, se situe à hauteur humaine. Bien entendu le risque est inexistant pour les stations fixes dont les antennes sont situées en hauteur.

Enfin, vu la prise en compte de plus en plus importante de ce risque dans le domaine public, il est nécessaire que la communauté radioamateur montre qu'elle est parfaitement consciente et compétente techniquement sur ce sujet.

Matthieu CABELLIC
F4BUC
Mail : f4buc@orange.fr
Web : <http://perso.orange.fr/f4buc/>

Liens :

<http://www.icnirp.de/>
<http://www.sante-radiofrequencies.org/>