

Etude de l'exposition aux ondes générée par les faisceaux hertziens

Direction de la Surveillance du Marché et de l'Exposition du Public
(DSE)

Mars 2022

INTRODUCTION	3
I. DESCRIPTION DES FAISCEAUX HERTZIENS	4
a) Fonctionnement	4
b) Les Faisceaux Hertziens en France	5
c) La réglementation	7
Synthèse section I	8
II. EVALUATION DE LA CONFORMITE	9
a) Les paramètres clés des antennes paraboliques	9
b) Evaluation de la distance de conformité	11
c) Application sur les données nationales	13
Synthèse section II	22
III. RESULTATS DE MESURE	23
a) Mesure exploratoire à proximité d'une antenne FH	23
b) Mesure de l'exposition selon le protocole ANFR	28
Synthèse section III	30
IV. CONCLUSION	31
ANNEXE 1 : EQUATIONS CARACTERISTIQUES DES ANTENNES FH	32
BIBLIOGRAPHIE	34

Introduction

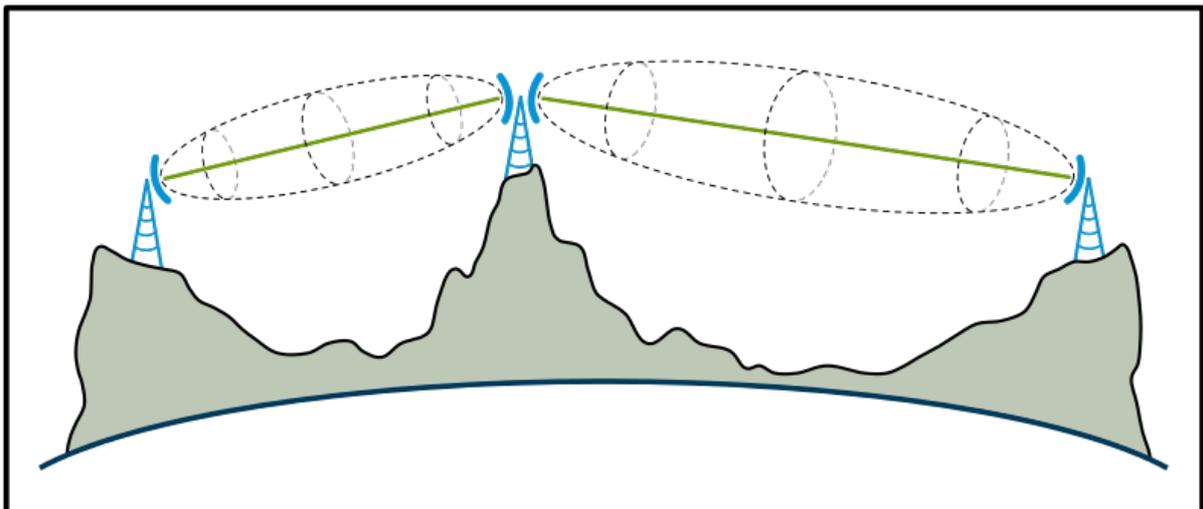
L'objectif de ce rapport est d'étudier l'exposition au rayonnement radioélectrique créée par les dispositifs appelés faisceaux hertziens (FH). Les FH désignent des liaisons point à point réalisées à partir d'antennes hautement directives, dont le rayonnement est faible en dehors du faisceau principal de l'antenne. Dans ce rapport, le fonctionnement de ces antennes particulières est exposé en donnant une vision des FH installés en France. Dans un deuxième temps, la méthode normative permettant d'évaluer la conformité est présentée. Enfin, dans une dernière partie, nous exposerons les résultats de mesures effectuées sur le terrain.

I. Description des Faisceaux Hertziens

a) Fonctionnement

Afin d'établir une communication entre deux points fixes, plusieurs solutions existent. Les solutions les plus immédiates tirent parti de transmetteurs physiques d'informations tels que les câbles de cuivres torsadés, les câbles coaxiaux ou la fibre optique. Les solutions « sans fil » à longue distance, quant à elles, reposent sur l'utilisation de système de radiocommunication comme les satellites, les liaisons transhorizon, les systèmes HF fixes, les stations placées sur des plateformes à haute altitude ou les connexions optiques en espace libre [1].

En général, les FH sont constitués de couples d'antennes paraboliques. Hautement directives, ces antennes rayonnent très peu en dehors de leur faisceau principal. Leur structure est en général composée d'un réflecteur circulaire dont la dimension est grande par rapport à la longueur d'onde, ce qui induit une grande directivité dans l'axe principal de la parabole et très peu de champ électromagnétique en dehors de celle-ci [2]. Le principe de fonctionnement est de placer deux antennes en ligne de vue directe pour construire un lien point à point (ou « bond »). Les liens point à point sont conçus de telle sorte qu'aucun objet ne puisse durablement croiser le signal radio dans un volume appelé ellipsoïde de Fresnel. Dans le cas contraire, la connexion du FH peut être altérée ou rompue. **Les équipements rayonnants doivent rester inaccessibles au public.**



Les FH sont fréquemment utilisés dans les domaines des télécommunications ou des réseaux de diffusion. **Les FH présentent l'avantage d'éviter l'installation d'une**

liaison filaire ou optique lorsque celle-ci apparaît difficile ou trop coûteuse. Une utilisation classique des FH est le transport (*backhaul*) des données dans les réseaux mobiles cellulaires. Dans les réseaux de téléphonie mobile, le terme *backhaul* est utilisé pour désigner la connexion entre les antennes relais de la partie radio et le cœur de réseau.

b) Les Faisceaux Hertziens en France

La France compte un peu plus de 123 000 antennes FH réparties sur tout le territoire et dont les fréquences s'étendent entre 1,3 GHz et 86 GHz. Les bases de données de l'ANFR permettent d'avoir une vision globale sur le parc d'antennes FH installées sur le territoire.



Figure 2 Photographie d'une antenne FH installé sur un toit d'immeuble

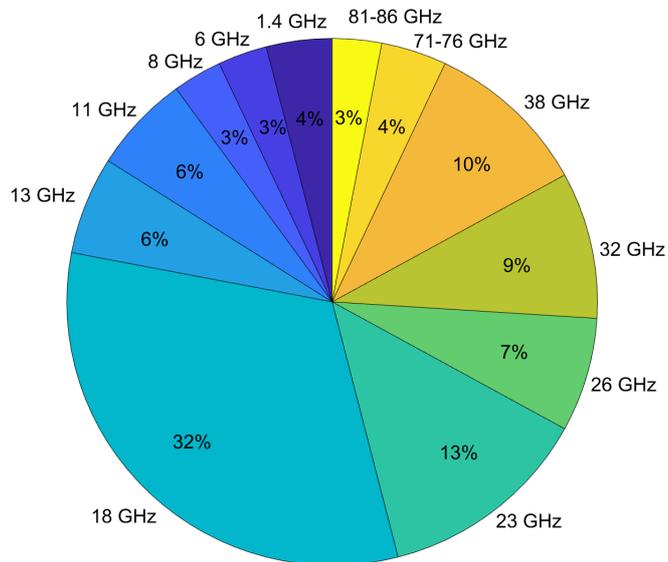


Figure 3 Répartition fréquentielle des faisceaux hertziens

La Figure 3 montre que les bandes de fréquences les plus utilisées sont 18 GHz, 23 GHz, 38 GHz et 32 GHz : elles représentent 64 % de la totalité des antennes FH en France.

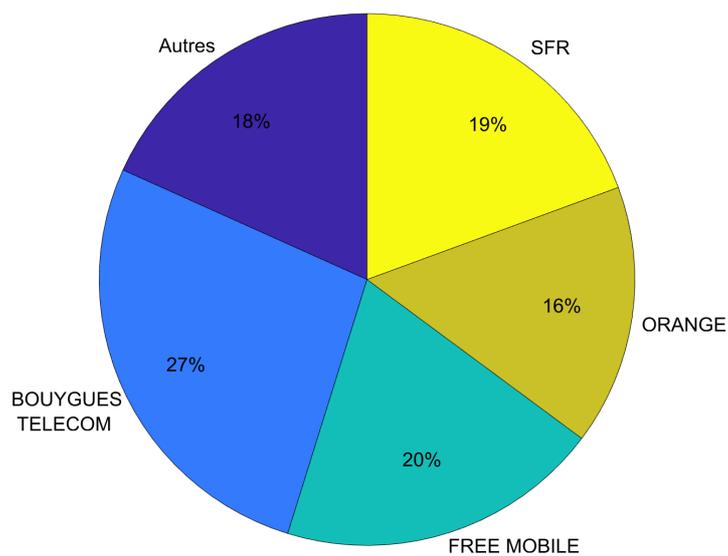


Figure 4 Répartition par opérateurs des faisceaux hertziens

La Figure 4 montre que les FH sont majoritairement exploités par les opérateurs de téléphonie mobile. La catégorie "Autres" regroupe des réseaux privés pour des grandes entreprises telles qu'EDF, la SNCF, RTE ou encore des FH installés par des collectivités.

c) La réglementation

La réglementation sur les FH tient compte de différentes normes. La série de normes ETSI EN 302 217 décrit les exigences techniques pour les FH. Plus spécifiquement, la norme ETSI EN 302 217-2 harmonisée par la directive européenne 2014/53/EU décrit les exigences essentielles pour le respect de l'article 3.2 de la directive 2014/53/EU qui traite de l'usage du spectre radioélectrique et des brouillages préjudiciables. Les normes ETSI EN 302 217-1 et -4 spécifient respectivement les exigences radioélectriques génériques des systèmes FH et les exigences non-essentielles sur les antennes FH [4, 5, 6, 7].

La réglementation sur l'évaluation de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques à proximité d'une antenne relais est décrite par les normes-produits harmonisées EN 50385:2017 et EN 50401:2017, qui cite la norme de base IEC EN 62232:2017, cette dernière décrivant les procédures et méthodes pour évaluer la conformité des installations [8, 9, 10]. **En particulier, l'annexe B.6.4 de la norme de base IEC EN 62232:2017 suggère une méthode pour l'évaluation de la conformité pour des antennes de type FH qui sera exposée dans ce document.** Cette méthode se fonde sur la méthode développée dans le rapport technique de l'ETSI TR 102 457 V 2.1.0 permettant d'évaluer la conformité des antennes FH [11].

Les valeurs limites de l'exposition du public sont inscrites dans la recommandation 1999/519/CE du Conseil de l'Union Européenne. Le Tableau 1 présente les valeurs limites d'exposition pour le public en termes de restrictions de base et de niveaux de référence.

Bande de fréquence	DAS _{10g} (tête et tronc)* (W/kg)	DAS _{10g} (membre) (W/kg)	Densité de Puissance S [†] (W/m ²)	Niveau de champ électrique E (V/m)
400 – 2000 MHz	2	4	f [MHz]/200	1.375* [√] f [MHz]
2 – 10 GHz	2	4	10	61
10 GHz – 300 GHz	-	-	10	61

Tableau 1 Limites pour l'exposition du public

* Il y a seulement le DAS_{10g} qui est reporté ici car le DAS corps entier n'est pas pertinent pour l'exposition au lien FH dès lors où l'exposition pour les dispositifs en ligne de vue directe vont induire une exposition localisée.

† Pour les fréquences inférieures à 10 GHz la densité de puissance doit être moyennée sur une période de 6 min, pour les fréquences supérieures à 10 GHz la densité de puissance doit être moyennée sur une période de 68/(f^{1.05}) minutes (f, fréquence en GHz).

Synthèse section I

Les FH sont constitués de couples d'antennes paraboliques. Hautement directives, ces antennes rayonnent très peu en dehors de leur faisceau principal.

Les FH présentent l'avantage d'éviter l'installation d'une liaison filaire ou optique lorsque celle-ci apparaît difficile ou trop coûteuse. La France compte un peu plus de 123 000 antennes FH réparties sur tout le territoire et dont les fréquences s'étendent entre 1,3 GHz et 86 GHz.

Les données de l'ANFR montrent que les bandes de fréquences les plus utilisées sont 18 GHz, 23 GHz, 38 GHz et 32 GHz : elles représentent 64 % de la totalité des antennes FH en France.

La norme de base IEC EN 62232:2017 suggère une méthode pour l'évaluation de la conformité pour des antennes de type FH qui sera exposée dans ce document.

II. Evaluation de la conformité

a) Les paramètres clés des antennes paraboliques

Le but d'une station FH est de transférer le maximum de puissance à la station de réception qui se trouve à distance, dans l'axe de l'antenne. La transmission doit éviter la dispersion d'énergie dans toute autre direction, qui pourrait en outre créer des interférences avec d'autres systèmes. En conséquence, **les antennes présentent un diagramme de rayonnement avec un lobe principal étroit et très directif dans la direction principale [1]**. Les antennes les plus utilisées pour les FH sont paraboliques à réflecteur, composées d'une alimentation (souvent des guides d'onde) située au foyer d'un paraboloïde de révolution comme cela est représenté à la Figure 5.

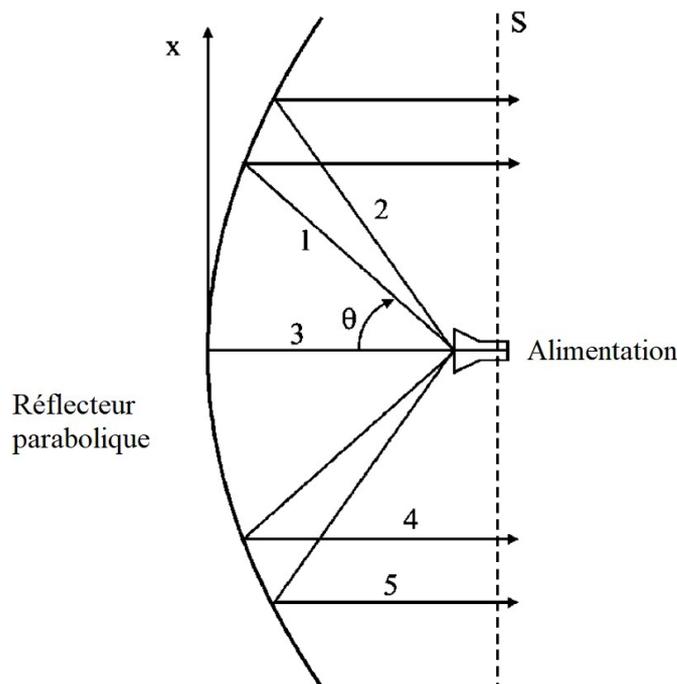


Figure 5 Schéma d'une antenne parabolique [1]

Les chemins qui rayonnent depuis l'alimentation sont réfléchis par la parabole et deviennent alors tous parallèles. Ces chemins sont équivalents en termes de distance. Une onde réfléchie empruntant le chemin n°1 prendra le même temps pour arriver sur une surface fictive S interceptant le faisceau que les ondes empruntant les chemins 2 à 5. Le rayonnement sphérique (quasi-omnidirectionnel) issu de l'alimentation devient après réflexion sur la parabole un front d'ondes se propageant en phase. Ce dispositif géométrique classique produit ainsi un faisceau à grande directivité.

Afin de d'évaluer la conformité des antennes FH, il est nécessaire de distinguer les notions de champ proche et lointain permettant de caractériser la nature du champ électrique en fonction de la distance par rapport à l'antenne FH. Les formules employées sont détaillées dans l'annexe 1.

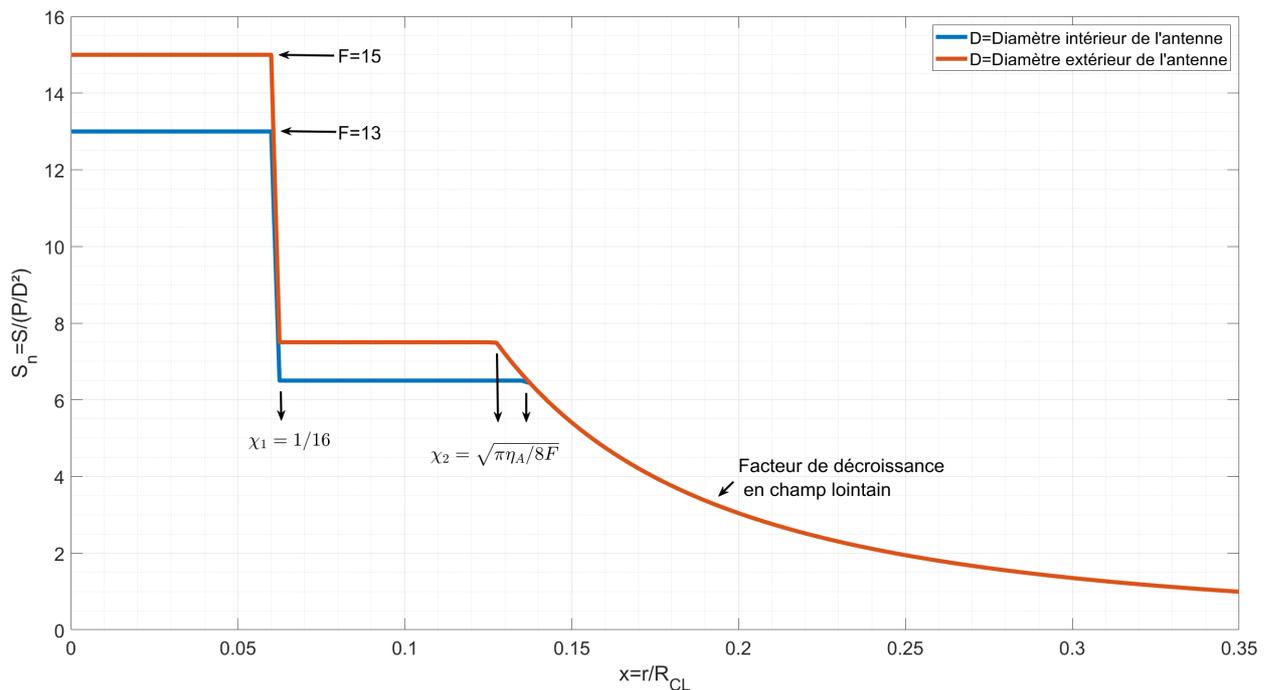


Figure 6

Modèle d'enveloppe pour la densité de puissance dans le lobe principal d'une antenne parabolique

La Figure 6 représente le **modèle d'enveloppe majorante pour la densité de puissance dans le lobe principal d'une antenne parabolique**. Elle représente la densité de puissance normalisée par rapport au facteur P/D^2 en fonction de la distance normalisée par rapport à la distance séparant champ proche et champ lointain R_{CL} . Cette enveloppe s'exprime en fonction d'un certain nombre de paramètres empiriques et physique de l'antenne (déterminées dans l'étude [11]) :

- F est un facteur maximisant la densité de puissance dans le champ proche de l'antenne parabolique ; il est égal à 13 ou 15 s'il on utilise respectivement le diamètre intérieur ou extérieur de l'antenne ;
- Les paramètres χ_1 et χ_2 correspondent aux deux premiers paliers de distances normalisées encadrant la transition de la densité de puissance. À partir de la distance normalisée χ_2 , l'enveloppe suit la décroissance définie par la densité

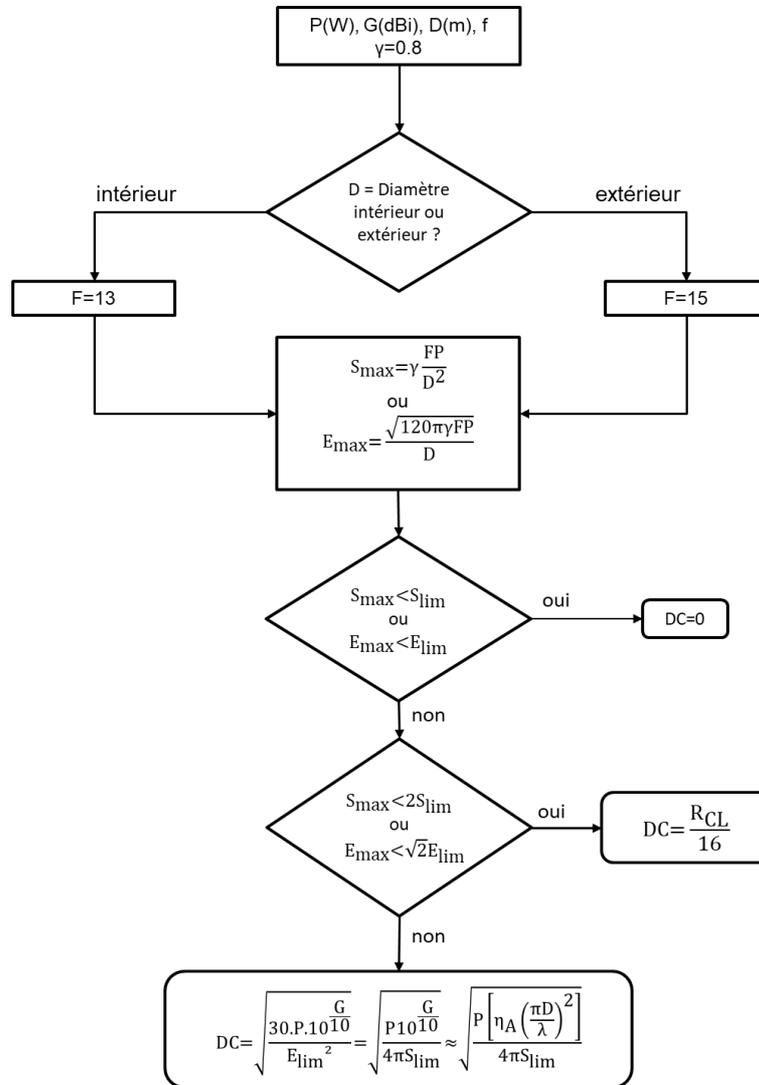
de puissance en champ lointain. Pour information, pour le tracé des courbes, le choix a été fait d'utiliser une efficacité d'ouverture $\eta_A=0,62$ qui représente une valeur typique des antennes FH.

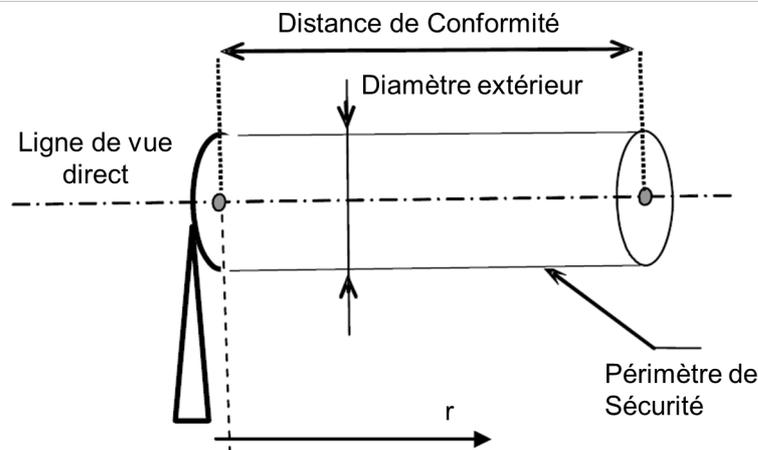
b) Evaluation de la distance de conformité

Le modèle d'enveloppe majorante défini précédemment a permis de mettre au point le logigramme présenté à la Figure 7 qui permet d'évaluer la conformité d'une antenne FH sur la base des paramètres clés décrivant celles-ci. **Evaluer la conformité d'une antenne revient donc à évaluer la distance à partir de laquelle la conformité aux limites d'exposition du public (présentés au Tableau 1) est respectée dans la ligne de vue directe de l'antenne.** Cette zone est plus communément appelée périmètre de sécurité [13, 11, 10]. **Dans le cas des antennes FH de forme parabolique comme décrit à la Figure 8, le périmètre de sécurité a la forme d'un cylindre.** Le diamètre extérieur de la parabole permet de constituer la base circulaire du cylindre et la hauteur de celui-ci sera déterminée grâce aux paramètres clés de l'antenne FH.

Les paramètres pertinents pour la distance de conformité (DC) sont la puissance transmise à l'antenne (P), le gain de l'antenne (G), le diamètre de l'antenne (D) et sa fréquence de fonctionnement sur la voie montante (f). La connaissance du diamètre extérieur ou intérieur permettra de choisir le facteur maximisant $F=13$ ou à 15 . Il est alors ensuite possible de calculer la densité de puissance maximale (ou le champ électrique maximal). **Si cette valeur est inférieure à la limite, cela signifie qu'aucun périmètre de sécurité n'est nécessaire. Si la valeur est située entre la limite et deux fois la limite, la distance de conformité sera proportionnelle à la frontière champ proche champ lointain R_{CL} . Enfin, lorsque la densité de puissance maximale est supérieure à deux fois la limite, la distance de conformité est calculée sur base de l'expression du champ approximé en champ lointain :**

$$E = \frac{\sqrt{30PG}}{r}$$





c) Application sur les données nationales

L'ANFR établit et tient à jour l'ensemble des documents relatifs à l'emploi des fréquences, notamment le fichier des stations radioélectriques. Plus spécifiquement, il est possible d'extraire les données des antennes FH afin d'appliquer le logigramme pour l'évaluation de la distance de conformité.

Dans notre analyse nous prendrons en compte les données de 123 636 antennes FH. Dans les bases de données de l'ANFR sont présents les paramètres suivants : puissance isotropique rayonnée équivalente (PIRE), dimension de l'antenne et fréquence d'utilisation dans le sens montant. Le gain de l'antenne sera calculé par la relation suivante :

$$G = \frac{\pi^2 D^2 \eta_A}{\lambda^2}$$

L'hypothèse est faite que l'ensemble des antennes FH ont une forme circulaire. Afin de maintenir un caractère conservatif à l'étude, on a considéré ici que l'efficacité de rayonnement η_A est égale à 1.

Dans un premier temps, les caractéristiques clés décrivant les antennes seront explorées statistiquement afin d'avoir une vision globale du parc des antennes FH installées en France (Figure 9 à Figure 12). Le Tableau 2 regroupe les paramètres statistiques des caractéristiques clés des antennes FH ainsi que les distances de conformité calculées selon le logigramme. Les paramètres statistiques présentés sont la moyenne, l'écart type, la médiane ainsi que les quantiles à 90 % et à 99 %. Afin d'affiner l'analyse de ces paramètres statistiques, la fréquence a été subdivisée par bloc de 20 GHz sauf pour l'intervalle 1,3 GHz à 2 GHz dont la limite d'exposition est différente des fréquences supérieures à 2 GHz. Sous chaque bande de fréquence est indiqué le nombre

d'antennes contenus dans cet intervalle. Pour les distances de conformité, le nombre d'éléments est également inscrit. Il faut lire le tableau de la manière suivante, pour la bande de fréquence entre 20 et 40 GHz, il y a 3 665 antennes où la densité de puissance maximale dépasse le seuil limite et 753 antennes où la densité de puissance maximale dépasse deux fois le seuil limite.

Bandes de Fréquences Nombre d'antennes	1,3 – 2 GHz N=4565					2 – 20 GHz N=61819					20 – 40 GHz N=48649					70 – 90 GHz N=8602				
	μ^{\ddagger}	σ^{\S}	Med ^{**}	q90 ^{††}	q99 ^{‡‡}	μ	σ	Med	q90	q99	μ	σ	Med	q90	q99	μ	σ	Med	q90	q99
Dimensions (m)	1,24	0,39	1,30	1,60	2,00	0,73	0,45	0,6	1,2	3,00	0,44	0,19	0,3	0,6	1,00	0,31	0,06	0,3	0,3	0,60
PIRE (dBW)	12,0	6,4	13	18,2	31,1	28,1	6,0	28,9	34,3	40,0	26,2	6,8	27,5	33,5	37,8	28,9	5,7	31,1	34,0	38,9
Gain (dBi)	24,7	3,9	25,5	27,7	29,6	40,2	3,5	41,0	44,7	48,3	41,8	3,6	41,8	46,2	49,0	48,0	1,4	48,3	48,3	54,3
Smax (dBW/m ²)	-3,1	9,6	-4,3	6,3	39,3	2,4	7,7	3,2	9,9	15,9	3,1	6,4	2,9	9,9	13,6	1,9	5,8	3,6	6,6	8,1
DC = 0 m	N=4189 (92 %)					N=56101 (91 %)					N=44231 (91 %)					N=8579 (99,7 %)				
DC(R _{CL}) (m)	N=89 (2 %)					N=3178 (5 %)					N=3665 (8 %)					N=24 (0,3 %)				
	0,56	0,38	0,49	0,86	1,54	0,88	0,65	0,68	1,68	3,94	0,91	0,11	0,88	0,97	1,42	2,57	0,52	2,72	2,83	3,09
DC(P,G) (m)	N=287 (6 %)					N=2540 (4 %)					N=753 (2 %)					N=1 ^{§§} (<0,1 %)				
	1,77	2,78	0,77	5,34	16,99	3,71	7,32	2,60	4,90	16,80	3,63	9,69	2,69	3,96	7,30	-	-	8,04	-	-

Tableau 2 Récapitulatif des paramètres statistiques d'intérêt des antennes FH et des distances de conformité non nulles par bandes de fréquence

La Figure 9 montre que la majorité des antennes fonctionne entre les fréquences 10 GHz et 40 GHz (83 % selon Figure 3). **Les PIRE sont pour la majorité des cas situés entre 0 et 40 dBW.** Les deux configurations les plus courantes (représentées par les deux pics les plus roses sur la Figure 9) se situent :

- entre 30 et 31 GHz pour des PIRE entre 18 et 21 dBW (4706 antennes),
- et entre 32 et 33 GHz pour des PIRE entre 30 et 33 dBW (3832 antennes).

De plus, le Tableau 2 montre que 90 % des PIRE sont en dessous de 34,3 dBW et 33,5 dBW respectivement dans les bandes 2 – 20 GHz et 20 – 40 GHz.

‡ Valeur moyenne

§ Ecart-type

** Valeur médiane

†† Quantile à 90 %

‡‡ Quantile à 99 %

§§ Les paramètres statistiques n'ont pas été calculés dans ce cas puisqu'il n'y a qu'une seule distance de conformité, qui a été reporté dans la case de la médiane

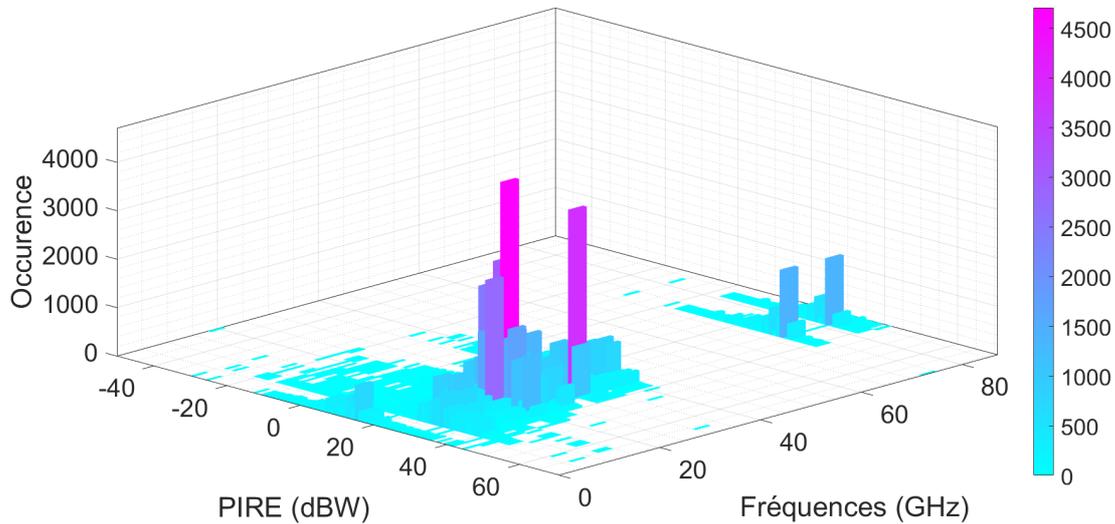


Figure 9 Histogramme bidimensionnel représentant la répartition fréquentielle et en puissance PIRE des FH

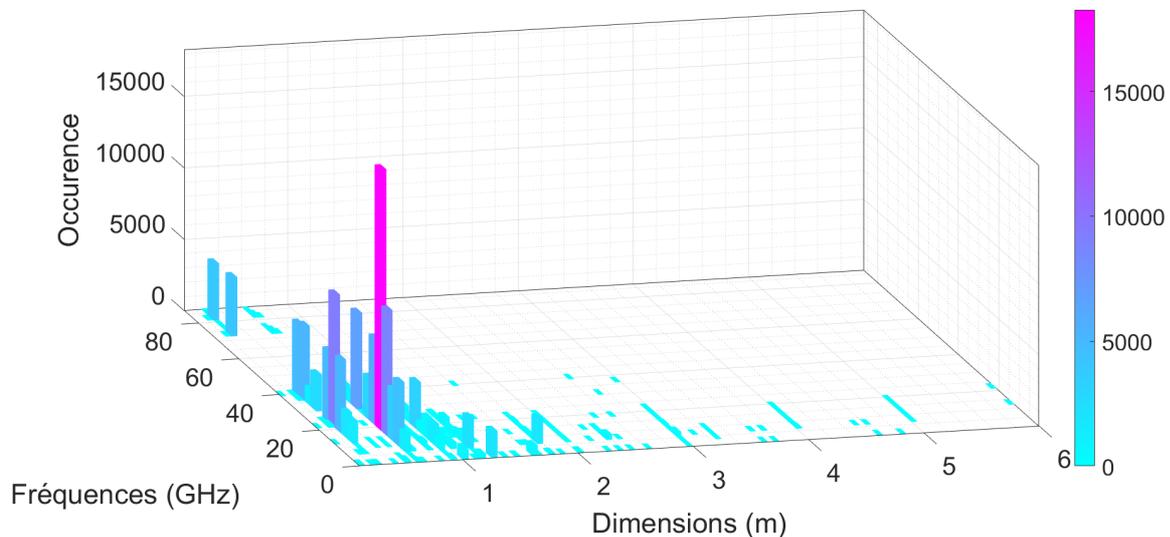


Figure 10 Histogramme bidimensionnel représentant la répartition fréquentielle et dimensionnelle des FH

La Figure 10 montre que le diamètre est inférieur à un mètre dans la grande majorité des cas. La configuration la plus courante se situe entre 18 et 21 GHz pour des dimensions entre 0,6 et 0,65 m. Le Tableau 2 montre logiquement que les valeurs moyennes et les écart-types des dimensions diminuent lorsque la fréquence augmente.

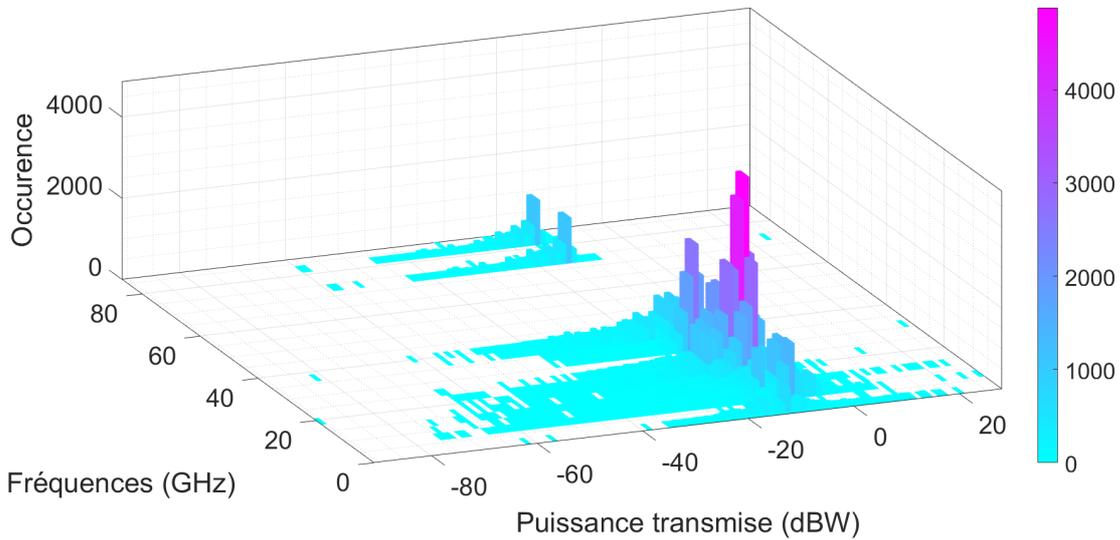


Figure 11 Histogramme bidimensionnel représentant la répartition fréquentielle et en puissance transmise aux antennes FH

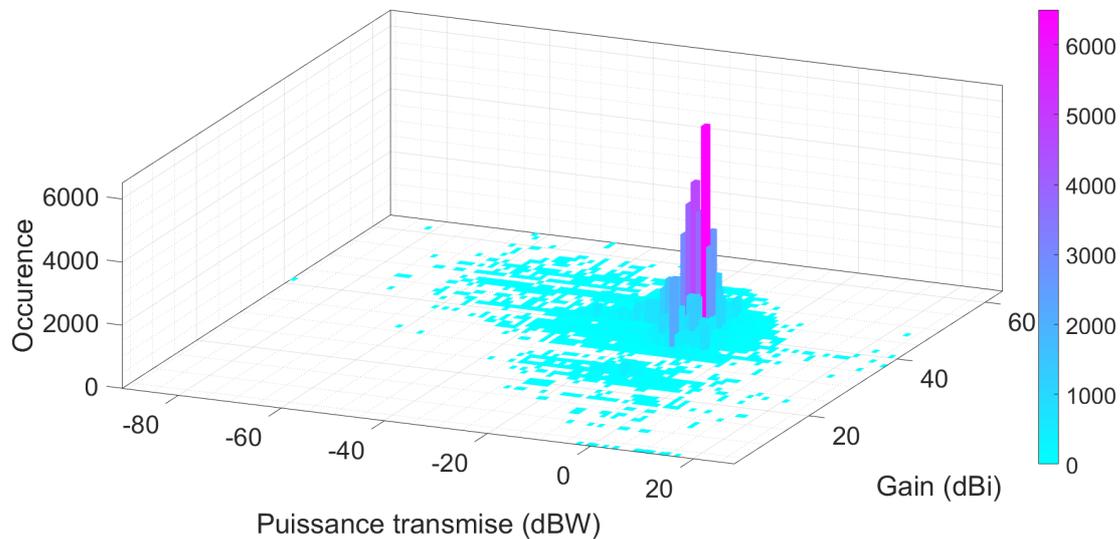


Figure 12 Histogramme bidimensionnel représentant la répartition en puissance transmise et en gain des antennes FH

La puissance transmise à l'antenne représentée à la Figure 11 a été obtenue par la relation suivante

$$P = PIRE + L - G$$

Où P est la puissance transmise exprimée en dBW, la PIRE est en dBW déclarée par les opérateurs, L traduit les pertes dans le circuit exprimées en dB et G est le gain en dBi estimé selon [1]. Les pertes ont été considérées comme nulles afin d'être le plus conservatif possible.

La Figure 11 montre que les puissances transmises s'étendent principalement entre -40 dBW et 0 dBW. En linéaire, cela équivaut à une étendue entre 0,1 mW et 1 W. La configuration la plus courante se situe entre 18 et 21 GHz pour des puissances transmises entre -12 et -10 dBW (9 181 antennes FH).

À titre indicatif, dans le guide des périmètres de sécurité, les antennes-relais macros, constituant l'essentiel des réseaux actuels, sont modélisées avec une puissance par bande de fréquence de 60 W et un gain de 18 dBi [13]. **Ceci montre que les antennes FH ont une puissance plus faible que celle des relais de téléphonie mobile. Cette faible puissance est compensée par des niveaux de gain élevés comme l'indique la Figure 12.** Notamment, pour les bandes de fréquence de 2 à 20 GHz, de 20 à 40 GHz et de 70 à 90 GHz, les valeurs moyennes de gain sont respectivement égales à 40,2, 41,8 et 48 dBi. La Figure 12 montre que la configuration la plus courante se situe entre 41 et 42 dBi pour une puissance transmise entre -11 et -10 dBW (6499 antennes).

La Figure 13 représente la répartition fréquentielle des densités de puissance maximales calculées. La valeur limite de la densité de puissance a été ajoutée sur la graduation 10 dBW/m^2 même si cette valeur limite n'est valable qu'à partir de 2 GHz (cf. Tableau 1). **Il apparaît que la grande majorité (91 %) des valeurs de densité de puissance maximales sont en dessous de la densité de puissance limite. Le même constat peut être fait par rapport à la valeur $2 \cdot S_{\text{lim}}$ (97 %) qui se situe au niveau de 13 dBW/m^2 pour les fréquences supérieures à 2 GHz.**

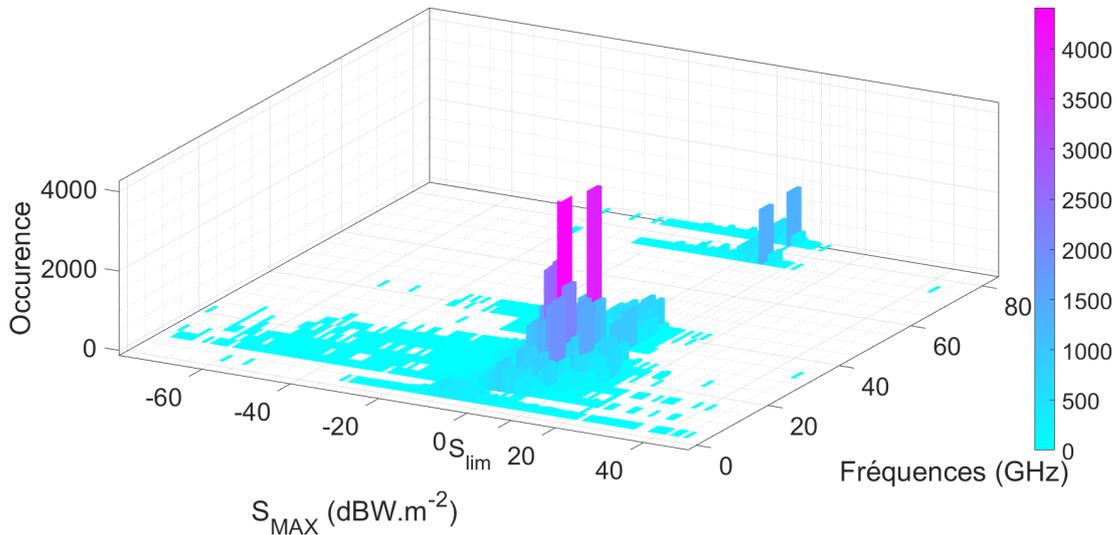


Figure 13 Histogramme bidimensionnel représentant la répartition fréquentielle et en Densité de Puissance maximale estimée des antennes FH

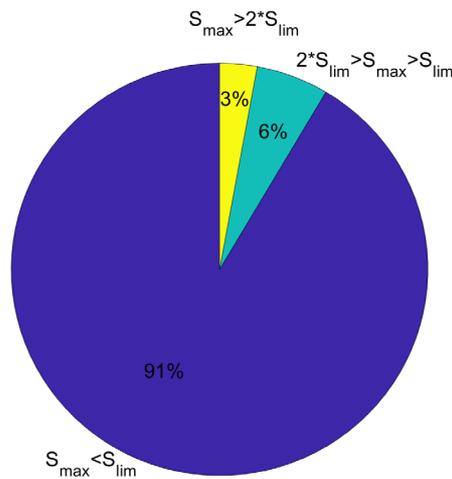


Figure 14 Répartition des densités de puissance maximale des antennes FH en comparaison aux limites du logigramme

La Figure 14 confirme la tendance puisqu'elle montre que, pour 91 % des antennes FH, il n'y a pas de périmètre de sécurité tandis que 9% en requièrent un. 6 % des périmètres de sécurité sont calculés à l'aide de la frontière champ proche champ lointain DC(R_{CL}) tandis que 3 % sont calculés par l'approximation en champ lointain DC(P,G).

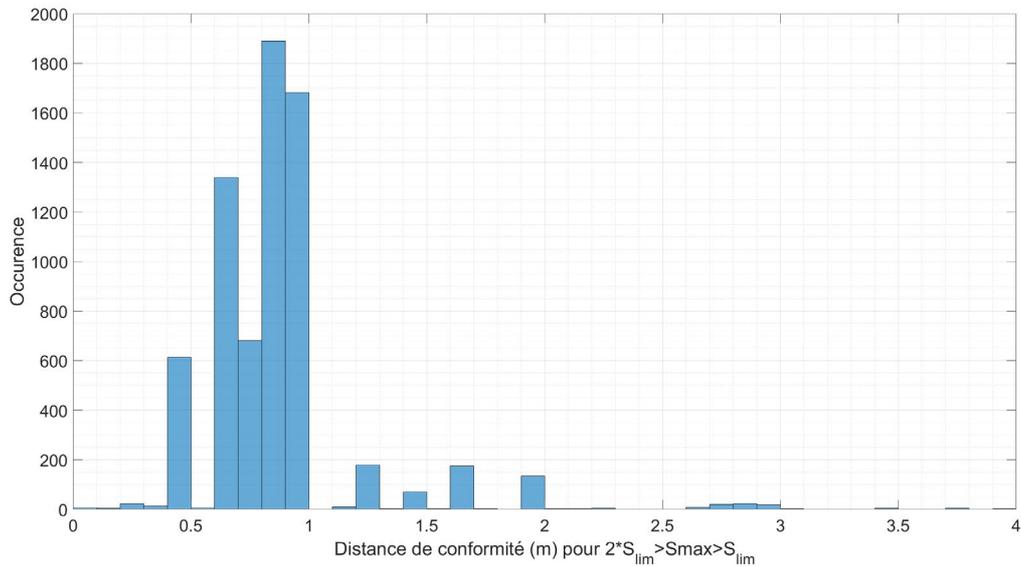


Figure 15 Histogramme de la distance de conformité pour les cas où $2 \cdot S_{lim} > S_{max} > S_{lim}$

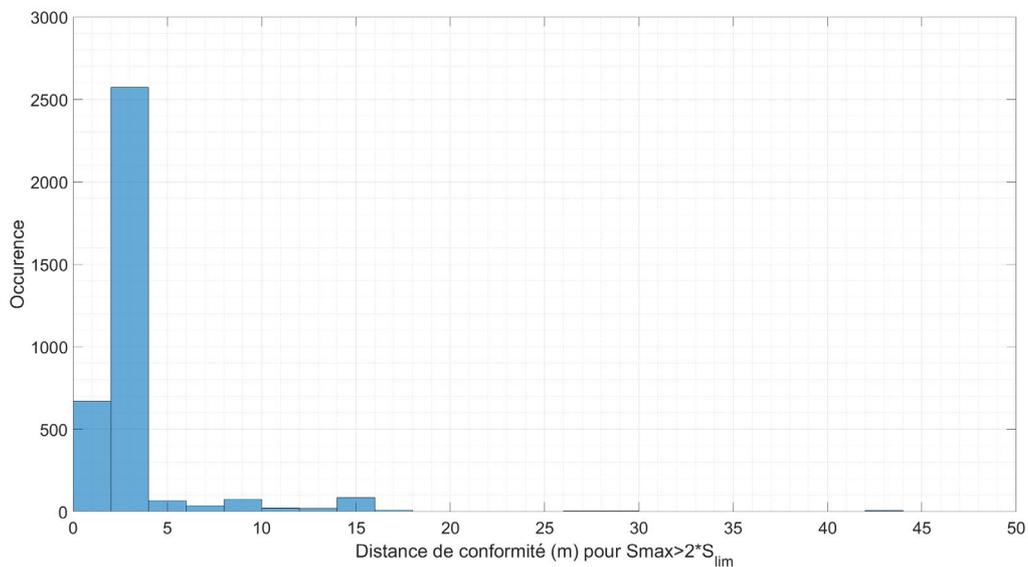


Figure 16 Histogramme de la distance de conformité pour les cas où $S_{max} > 2 \cdot S_{lim}$

Les Figure 15 et Figure 16 ainsi que le Tableau 2 montrent que **les distances de conformité varient entre quelques centimètres et un peu plus d'une quinzaine de mètres**. Cela montre également que les facteurs d'échelle ne sont pas les mêmes entre les distances de conformité calculés sur la base de la frontière champ proche –

champ lointain et sur la base de l'approximation du niveau champ lointain. Par exemple, entre 2 et 20 GHz, 90% des distances de conformité des antennes dont la densité de puissance maximale respecte $2 \cdot S_{lim} > S_{max} > S_{lim}$ sont inférieures à 1,68 m tandis que 90% des distances de conformité des antennes pour lesquelles $S_{max} > 2 \cdot S_{lim}$ sont inférieures à 4,90 m. Entre 20 GHz et 40 GHz, 90% des distances de conformité des antennes pour lesquelles $2 \cdot S_{lim} > S_{max} > S_{lim}$ sont inférieures à 0,97 m tandis que 90% des distances de conformité des antennes pour lesquelles $S_{max} > 2 \cdot S_{lim}$ sont inférieures à 3,96 m.

La Figure 17 a été tracée en superposant les histogrammes bidimensionnels des trois différentes populations d'antennes ($S_{max} < S_{lim}$, $2 \cdot S_{lim} > S_{max} > S_{lim}$, $S_{max} > 2 \cdot S_{lim}$). L'histogramme bidimensionnel représente le nombre d'occurrences en fonction de deux variables : le gain de l'antenne et la PIRE. La différence entre le nombre d'occurrences de la population $S_{max} < S_{lim}$ et les populations $2 \cdot S_{lim} > S_{max} > S_{lim}$, $S_{max} > 2 \cdot S_{lim}$ est telle que la répartition est difficilement analysable (et cela même en normalisant les niveaux d'occurrences). Cependant, il est intéressant de regarder cette histogramme en 2D (ou vue dite « de haut ») afin d'y repérer si les différentes populations se trouvent dans des régions distinctes. **La Figure 17 montre que les antennes FH ayant une distance de conformité non nulle se concentrent dans une zone du graphique que l'on pourrait délimiter par une droite.** Cette droite empirique de séparation représentée en mauve sur la figure a pour équation :

$$G(\text{dBi}) = \frac{12}{11} \times \text{PIRE}(\text{dBW}) - 15$$

Il serait intéressant par la suite de vérifier que les nouvelles antennes FH qui seront installées suivent cette même répartition. **Sur la base de la valeur de puissance PIRE et du gain estimé, il sera possible de se projeter sur la probabilité relative que l'antenne FH nouvellement installée possède ou non un périmètre de sécurité.**

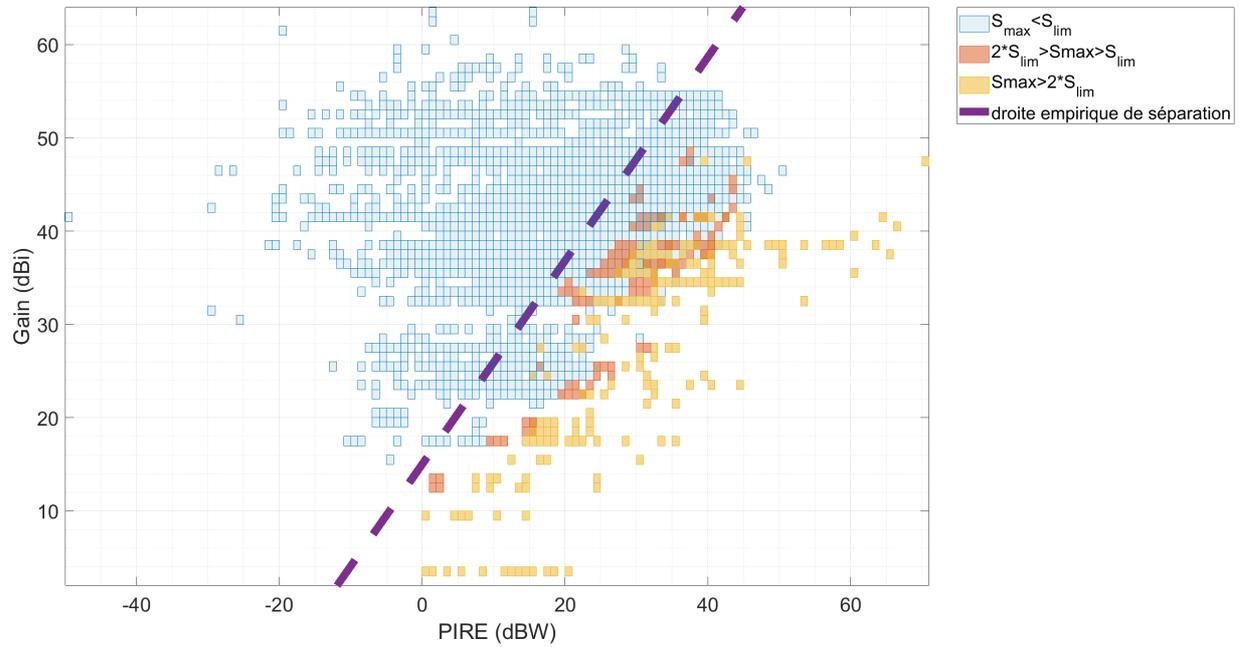


Figure 17 Histogramme représentant la répartition en puissance PIRE et en Gain pour les trois catégories de densités de puissance maximale

Synthèse section II

Les antennes présentent un diagramme de rayonnement avec un lobe principal étroit et très directif dans la direction principale [1]. Le modèle d'enveloppe majorante pour la densité de puissance dans le lobe principal d'une antenne parabolique nous a permis d'évaluer la conformité des FH en France.

Évaluer la conformité d'une antenne revient à évaluer la distance à partir de laquelle la conformité aux limites d'exposition du public est respectée dans la ligne de vue directe de l'antenne. Dans le cas des antennes FH de forme parabolique le périmètre de sécurité a la forme d'un cylindre.

Si cette valeur de densité de puissance maximale est inférieure à la limite, cela signifie qu'aucun périmètre de sécurité n'est nécessaire. Si la valeur de densité de puissance maximale est supérieure à la limite alors un périmètre de sécurité sera nécessaire.

L'ANFR établit et tient à jour l'ensemble des documents relatifs à l'emploi des fréquences, notamment le fichier des stations radioélectriques. Ces données montrent que :

- les PIRE sont pour la majorité des cas situés entre 0 et 40 dBW,
- 90 % des PIRE sont en dessous de 34,3 dBW et 33,5 dBW respectivement dans les bandes 2 – 20 GHz et 20 – 40 GHz,
- les puissances transmises s'étendent principalement entre -40 dBW et 0 dBW. En linéaire, cela équivaut à une étendue entre 0,1 mW et 1 W.

Ceci montre que les antennes FH ont une puissance plus faible que celle des relais de téléphonie mobile. Cette faible puissance est compensée par des niveaux de gain élevés.

Il apparaît que la grande majorité (91 %) des valeurs de densité de puissance maximales sont en dessous de la densité de puissance limite. Ceci signifie que pour 91 % des antennes FH, il n'y a pas de périmètre de sécurité tandis que 9% en requièrent un. Les distances de conformité varient entre quelques centimètres et un peu plus d'une quinzaine de mètres.

L'analyse montre que sur la base de la valeur de PIRE et du gain estimé, il sera possible de se projeter sur la probabilité relative que l'antenne FH nouvellement installée possède ou non un périmètre de sécurité.

III. Résultats de mesure

a) Mesure exploratoire à proximité d'une antenne FH

L'objectif de la mesure exploratoire est de montrer en environnement réel la manière dont va décroître le rayonnement issu d'un FH. La mesure a eu lieu à l'Hôtel Ibis Budget situé au 30-32 Avenue de la Division Leclerc à Fresnes (94260). Comme le montre la Figure 18 qui représente une capture d'écran issue du site cartoradio.fr, un certain nombre d'antennes de téléphonie mobile sont présentes sur le toit de cet hôtel. Parmi celles-ci se trouvent deux antennes FH, l'une fonctionnant à 38 GHz et l'autre fonctionnant à 73 GHz. **La mesure a permis d'évaluer l'exposition globale et également de se focaliser sur l'antenne FH fonctionnant à 38 GHz** dont les principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.

Numéro de support	1303383
Numéro de station	094 275 0636
Numéro d'aérien	5076833
Fréquence centrale d'émission	37.646 GHz
Fréquence centrale de réception	38.906 GHz
Largeur de bande	56 MHz
Azimuth	236 ^{°***}
PIRE	24.1 dBW
Dimension	0.3 m
Hauteur par rapport au sol	18 m

Tableau 3 Caractéristiques de l'antenne FH d'intérêt sur le toit de l'hôtel

*** L'azimuth 0° indique la direction nord et le sens croissant est horaire.

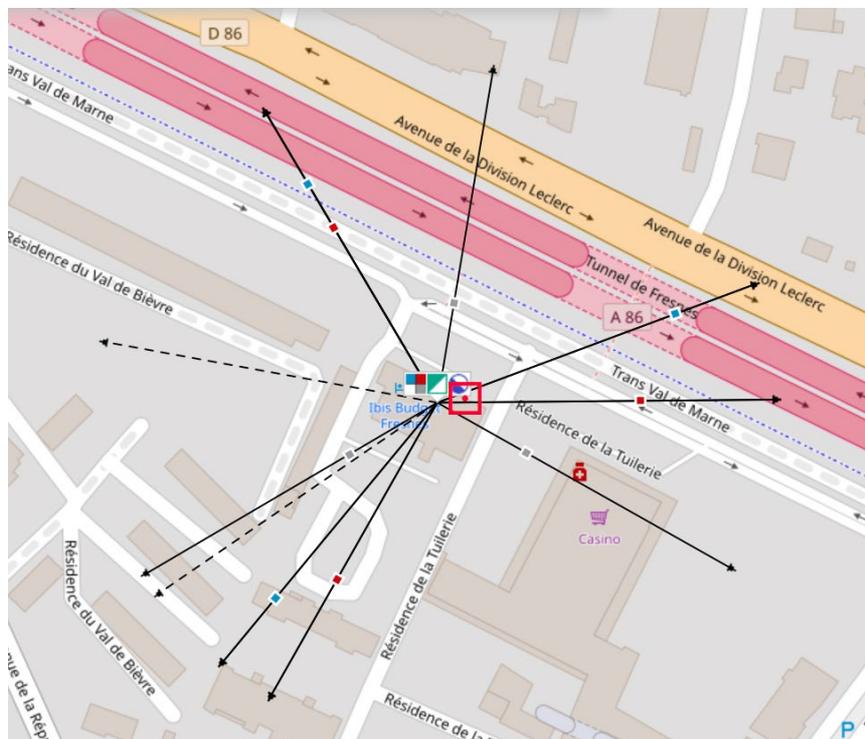


Figure 18 Capture d'écran issue du site cartoradio.fr de l'Hôtel Ibis budget de Fresnes avec l'orientation azimutale de l'ensemble des antennes sur son toit

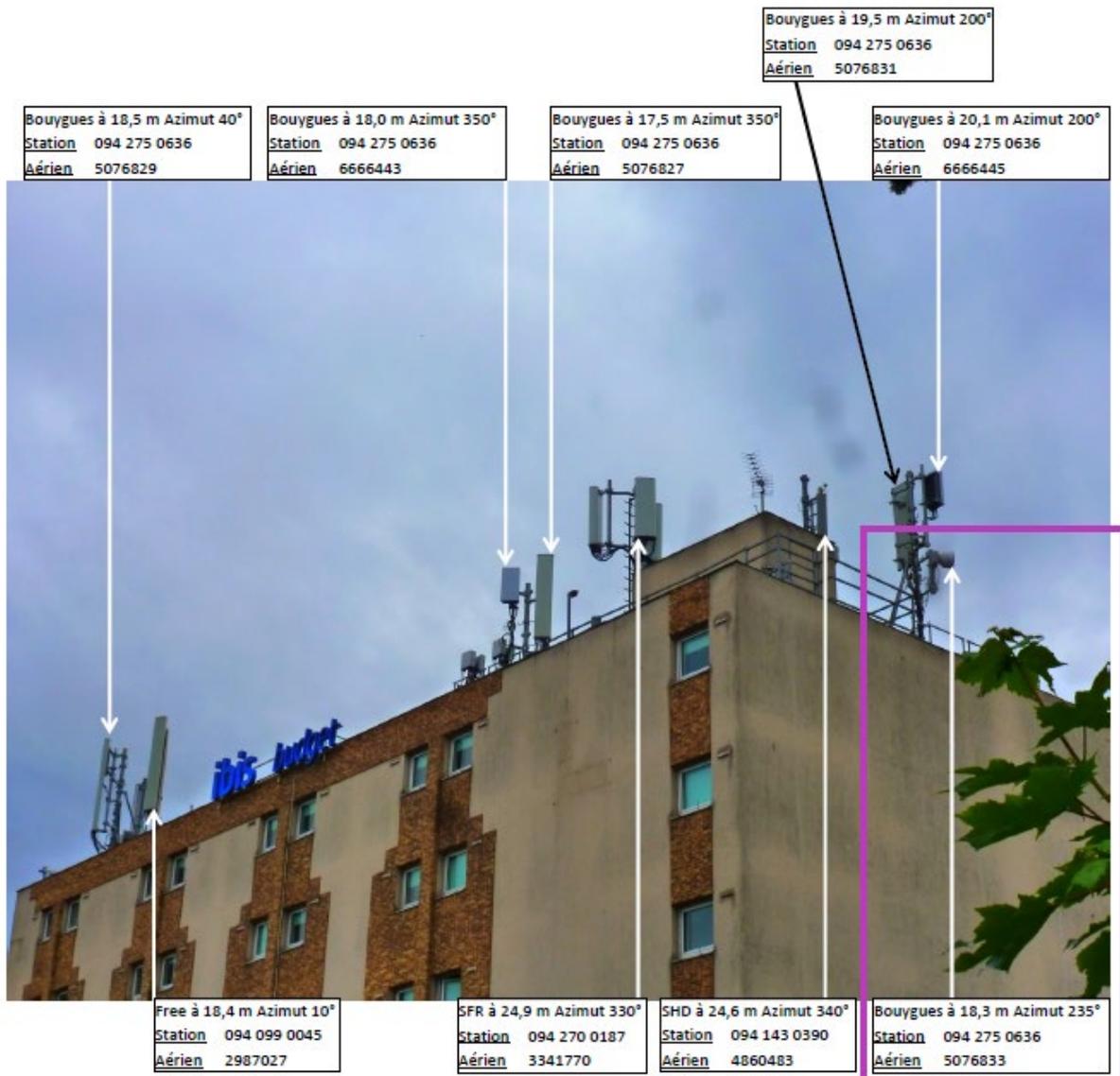


Figure 19 Hôtel Ibis budget de Fresnes avec la description d'une partie des antennes présentes sur son toit

La Figure 19 présente le toit de l'hôtel et sur la partie droite de la photographie apparaît l'antenne FH étudiée, entourée d'un rectangle rose. Le toit de l'hôtel n'est pas accessible au public mais les équipes de l'ANFR disposent d'autorisations adaptées pour effectuer des mesures sur le toit. **Les mesures ont été effectuées en deux emplacements dont on voit des photographies à la Figure 20 : la position n°1 se trouve sur le toit à proximité directe de l'antenne FH, la position ayant été choisie afin**

qu'elle soit la plus proche possible du faisceau de l'antenne (la distance entre l'antenne et la position n°1 est d'à peu près 6 m).



Figure 20 Positions de mesure avec la sonde large bande (cas A – 20 MHz à 40 GHz) sur le toit (n°1) et dernier étage sous l'antenne FH (n°2)

La position n°2 se situe au dernier étage du bâtiment dans la cage d'escalier. La position n°2 se situe un étage en dessous de l'antenne FH. Aux positions n°1 et n°2 ont été effectuées des mesures globales de l'exposition et des mesures détaillées en fréquence permettant de connaître le contributeur principal de l'exposition. Les mesures aux positions n°1 et n°2 ont été effectuées à une hauteur de 1,50 m par rapport au sol. La mesure globale de l'exposition a été effectuée à l'aide d'une sonde large bande qui couvre la bande de fréquence 20 MHz à 40 GHz et la mesure détaillée en fréquence a été effectuée avec un analyseur de spectre et sa sonde associée qui couvre les bandes 30 MHz – 6 GHz.

	Mesure globale de l'exposition (20 MHz – 40 GHz)	Mesure détaillée en fréquence (30 MHz – 6 GHz)
Position n°1	17,6 V/m	15,7 V/m
Position n°2	2,1 V/m	2,3 V/m

Tableau 4 Résultats de mesure à la sonde large bande et en cumul de service aux positions n°1 et n°2



La mesure détaillée en fréquence permettra d'identifier les contributions probablement plus fortes de la téléphonie mobile dans un environnement avec une forte présence d'antennes-relais.

Le Tableau 4 montre que les mesures globales de l'exposition et détaillée en fréquence à la position n°1 sont du même ordre de grandeur. La mesure globale de l'exposition est légèrement supérieure à la mesure détaillée en fréquence, ceci permet de conclure sur le fait que l'essentiel des contributeurs proviennent de la bande 30 MHz – 6 GHz. À la position n°1, les principales bandes contributrices sont : LTE 700 avec 7,2 V/m, LTE 800 avec 4,4 V/m, TM 900^{†††} avec 4,3 V/m, TM 1800^{†††} avec 9,2 V/m, UMTS 2100 avec 2,75 V/m et LTE 2600 à 6,4 V/m.

Le Tableau 4 montre également que les mesures globales de l'exposition et détaillée en fréquence à la position n°2 sont également du même ordre de grandeur. Cependant, la mesure détaillée en fréquence est légèrement supérieure à la mesure globale de l'exposition, ceci s'explique par les faibles niveaux mesurés et par les bilans d'incertitude de ces mesures qui peuvent induire ce genre de situation. À la position, les principales bandes contributrices sont : LTE 700 avec 0,74 V/m, LTE 800 avec 0,78 V/m, TM 900 avec 0,65 V/m, TM 1800 avec 0,79 V/m, UMTS 2100 avec 1,58 V/m, LTE 2600 avec 0,53 V/m.

Ces mesures montrent que le niveau global de l'exposition baisse considérablement entre le toit et le dernier étage de l'hôtel (division par un facteur 8 environ) et que, par déduction, les contributeurs à l'exposition entre 6 GHz et 40 GHz sont faibles puisque les différences entre mesure globale et détaillée en fréquence sont du même ordre de grandeur.

La Figure 21 montre l'analyse spectrale qui a été faite à proximité de l'antenne FH d'intérêt en se focalisant sur sa bande d'émission. L'instrument de mesure utilisé est un analyseur de spectre connecté à une antenne cornet étalonnée. **La première observation faite sur site montre qu'il faut impérativement être dans le faisceau de l'antenne et assez proche de celle-ci pour voir son signal d'émission. La mesure a été effectuée à différentes distances de l'antenne dans son faisceau. On constate que lorsque l'on passe d'une distance de 5 cm à 1 m le signal est réduit de 20 dB environ, ce qui équivaut à une division de la puissance par 100 (ou du champ électrique par 10). On constate que lorsque l'on passe d'une distance de 5 cm à 2 m le signal est réduit de 30 dB environ, ce qui équivaut à une division de la puissance par 1 000 (ou du champ électrique par 100).**

Pour information, sur base des paramètres de l'antenne FH (Tableau 3), les grandeurs permettant d'évaluer la distance de conformité ont été calculées selon le logigramme de la Figure 7. Le gain estimé est de 41,5 dBi et la puissance transmise est de -17.4 dBW, on en déduit que la densité de puissance maximale est de 2,43 W/m². La densité

††† Téléphonie Mobile dans la bande 900 MHz regroupant les services GSM et UMTS

††† Téléphonie Mobile dans la bande 1800 MHz regroupant les services GSM et LTE

de puissance maximale étant inférieure à 10 W/m^2 , cela signifie que la distance de conformité est nulle, c'est-à-dire, qu'il n'y a pas de périmètre de sécurité pour cette antenne.



Figure 21 Description de la variation de l'analyse spectrale en fonction de la distance par rapport à l'antenne FH et dans son faisceau

b) Mesure de l'exposition selon le protocole ANFR

Des mesures accréditées ont également été effectuées dans des espaces accessibles au public ou chez des particuliers qui sont plus ou moins distants d'antennes FH. Il y a six emplacements en intérieur et huit emplacements en extérieur. Les mesures ont été effectuées en suivant le protocole de mesure de l'ANFR [14]. Le cas A a été mesuré sur la bande de fréquence 100 kHz à 40 GHz tandis que

le cas B a été mesuré sur la bande 100 kHz à 6 GHz lorsque celui-ci a été fait. Les rapports de mesure détaillés sont tous disponibles sur le site cartoradio.fr.

Les résultats de mesures du niveau global de l'exposition présentés dans le Tableau 5 montrent que les niveaux sont très faibles par rapport aux valeurs limites de l'exposition. Les techniciens du laboratoire mandaté ont également pu surveiller le spectre pour les fréquences supérieures à 6 GHz, aucune émission significative n'a été détectée.

Adresse	Code	Commune	Type de site	Bande de Fréquences des FH à proximité	cas A : 100 kHz - 40 GHz (V/m)
30 AVENUE EDISON	75013	PARIS	Intérieur	11; 19; 25; 33; 38	2,81
4 PLACE D'OBERURSEL	93800	EPINAY SUR SEINE	Extérieur	18 ; 19; 23; 25; 33; 38;	1,64
15 CHEMIN DU MOULON	91190	GIF SUR YVETTE	Extérieur	32	1,42
3 RUE DE BOILEAU	92000	NANTERRE	Extérieur	13 ; 25; 38	1,08
11 RUE DE LA GIRODERIE	78120	RAMBOUILLET	Extérieur	18; 22; 23	1,46
114 RUE EDOUARD VAILLANT	94800	VILLEJUIF	Extérieur	18; 22; 24; 33; 38;	1,75
26 AVENUE DU DOMAINE DE VIALLE	33270	BOULIAC	Extérieur	6; 11; 13; 18; 22; 25; 32; 33; 38;	2,61
RUE FEUDON	92210	SAINT CLOUD	Extérieur	22; 37;	0,7
14 RUE BEARN (Madame C., balcon)	92210	SAINT CLOUD	Intérieur	22; 37;	0,97
14 RUE BEARN (Madame J., chambre)	92210	SAINT CLOUD	Intérieur	22; 37;	0,28
14 RUE BEARN (Monsieur C., balcon)	92210	SAINT CLOUD	Intérieur	22; 37;	1,07
13 RUE BEARN (Monsieur T., chambre)	92210	SAINT CLOUD	Intérieur	22; 37;	0,81
21 RUE DU 18 JUIN 1940	92210	SAINT CLOUD	Intérieur	22; 37;	0,57
RUE DES ETANGS	70290	PLANCHER-BAS	Extérieur	19; 32;	0,35

Tableau 5 Adresses des emplacements et résultats des mesures résumés

Synthèse section III

La mesure a permis d'évaluer l'exposition globale et également de se focaliser sur l'antenne FH fonctionnant à 38 GHz.

Ces mesures montrent que le niveau global de l'exposition baisse considérablement entre le toit et le dernier étage de l'hôtel (division par un facteur 8 environ) et que, les contributeurs à l'exposition entre 6 GHz et 40 GHz sont faibles puisque les différences entre mesure globale et détaillée en fréquence sont du même ordre de grandeur.

L'analyse spectrale montre qu'il faut impérativement être dans le faisceau de l'antenne et assez proche de celle-ci pour voir son signal d'émission. On constate que lorsque l'on passe d'une distance de 5 cm à 1 m le signal est réduit de 20 dB environ, ce qui équivaut à une division de la puissance par 100 (ou du champ électrique par 10). On constate que lorsque l'on passe d'une distance de 5 cm à 2 m le signal est réduit de 30 dB environ, ce qui équivaut à une division de la puissance par 1 000 (ou du champ électrique par 100).

Des mesures accréditées ont également été effectuées dans des espaces accessibles au public ou chez des particuliers qui sont plus ou moins distants d'antennes FH. Il y a six emplacements en intérieur et huit emplacements en extérieur. Les résultats de mesures du niveau global de l'exposition montrent que les niveaux sont très faibles par rapport aux valeurs limites de l'exposition et qu'aucune fréquence FH n'a été détectée.

IV. Conclusion

Cette étude a permis de donner une vision globale des antennes FH installées en France. Les données de l'ANFR montrent que les bandes de fréquences les plus utilisées sont 18 GHz, 23 GHz, 38 GHz et 32 GHz : elles représentent 64 % de la totalité des antennes FH en France. Les antennes FH ont une puissance plus faible que celle des relais de téléphonie mobile. Cette faible puissance est compensée par des niveaux de gain élevés.

Elle a également permis d'exposer les outils normatifs pour l'évaluation de la conformité pour les antennes FH. La mise en œuvre de l'évaluation de la conformité a montré que pour l'immense majorité des antennes FH, il n'y a pas de périmètre de sécurité car les puissances transmises sont faibles. Pour 91 % des antennes FH, il n'y a pas de périmètre de sécurité tandis que 9% en requièrent un. Les distances de conformité varient entre quelques centimètres et un peu plus d'une quinzaine de mètres. L'analyse montre que sur la base de la valeur de puissance PIRE et du gain estimé, il sera possible de se projeter sur la probabilité relative que l'antenne FH nouvellement installée possède ou non un périmètre de sécurité.

La mesure exploratoire et les mesures suivant le protocole de l'ANFR ont donné des repères quantitatifs vis-à-vis de l'exposition aux antennes FH. La mesure exploratoire a montré qu'il faut être dans le faisceau de l'antenne et assez proche de celle-ci (inférieur à un mètre) pour voir son signal d'émission. Les mesures dans des espaces accessibles au public ou chez des particuliers montrent que les niveaux sont très faibles par rapport aux valeurs limites de l'exposition et qu'aucune fréquence FH n'a été détectée.

Annexe 1 : équations caractéristiques des antennes FH

La différence entre la zone de champ proche et la zone de champ lointain pour des antennes paraboliques réside dans la forme du champ. Le champ est planaire dans la zone de champ proche tandis qu'il est de forme sphérique dans la zone de champ lointain. La frontière entre champ proche et champ lointain est délimité par l'expression suivante :

$$R_{CL} = \frac{2D^2}{\lambda}$$

Où R_{CL} est la frontière entre champ proche et champ lointain, D est le diamètre de l'antenne FH et λ est la longueur d'onde.

La longueur d'onde est liée à la fréquence de transmission de l'antenne par la relation $\lambda = c/f$ avec c étant la célérité de la lumière et f la fréquence de transmission.

Le gain dans une direction donnée est défini comme le ratio entre l'intensité de rayonnement d'une antenne et l'intensité de rayonnement d'une antenne isotrope de même puissance. Le gain d'une antenne renseigne sur la capacité d'une antenne à rayonner plus efficacement dans une direction spécifique plutôt qu'une autre [12].

Dans le champ lointain de l'antenne, la densité de puissance (exprimée en $W.m^{-2}$) et le champ électrique E (exprimé en $V.m^{-1}$) sont liés par la relation suivante :

$$S = \frac{E^2}{\sqrt{\mu / \epsilon}} = \frac{E^2}{120 \pi}$$

Où μ est la perméabilité du milieu de propagation et ϵ sa permittivité. La densité de puissance dans la région du champ lointain est inversement proportionnelle au carré de la distance à l'antenne. Ainsi, la densité de puissance décroît très rapidement avec la distance et les niveaux les plus élevés apparaissent dans le champ proche de l'antenne. Cependant, la densité de puissance dans le champ proche oscille, entre des minimas et des maximas en fonction de la distance. Ces oscillations dépendent de la fréquence et du diamètre de l'antenne. Le calcul de la densité de puissance dans le champ lointain s'obtient par l'expression suivante :

$$S = \frac{PG}{4 \pi r^2}$$

Où P est la puissance transmise à l'antenne (en W), G le gain de l'antenne et r la distance par rapport à l'antenne (en m). L'équation de champ lointain surestime la densité de puissance comme cela a pu être démontré [11].

La densité de puissance en champ lointain possède également une expression alternative :

$$S = S_{CL} \left(\frac{R_{CL}}{r} \right)^2$$

Où S_{CL} est la densité de puissance à la distance R_{CL} . Le gain d'une antenne parabolique peut s'exprimer en fonction de son efficacité d'ouverture appelé η_A [1], de la manière suivante :

$$G = \frac{\pi^2 D^2 \eta_A}{\lambda^2}$$

La densité de puissance à la distance de R_{CL} peut alors être exprimée de la manière suivante :

$$S_{CL} = \frac{PG}{4\pi (2D^2/\lambda)^2} = \frac{4\pi A \eta_A P / \lambda^2}{4\pi (2D^2/\lambda)^2} = \frac{\pi P \eta_A}{16D^2}$$

Où A est l'aire du cercle définie par l'antenne parabolique. L'expression de la densité de puissance devient alors :

$$S = \frac{\pi P \eta_A}{16D^2} \left(\frac{R_{CL}}{r} \right)^2$$

On peut alors définir la densité de puissance normalisée par rapport à P/D^2 dont l'expression est :

$$S_n = \frac{\pi \eta_A}{16} \left(\frac{R_{CL}}{r} \right)^2$$

Par ces expressions, il est possible de caractériser la densité de puissance dans le champ lointain de l'antenne. Le calcul du champ dans le champ proche de l'antenne est en général complexe et requiert la connaissance précise de la distribution de champ dans le plan d'ouverture de l'antenne. Une enveloppe majorante a été définie pour l'évaluation de l'exposition aux antennes de FH de forme circulaire [11]. Cette enveloppe a été définie sur base empirique regroupant des simulations et mesures d'antennes FH circulaires.

Bibliographie

- [1] P. Angueira et J. A. Romo, Microwave Line Of Sight Link Engineering, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [2] IEC TR 62669:2019, , Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure.
- [3] JORF n°0035 du 11 février 2018, Décision n°2017-1332 du 9 novembre 2017 fixant les conditions d'utilisation des fréquences radioélectriques par les installations radioélectriques des liaisons point-à-point coordonnées du service fixe.
- [4] ETSI, «EN 302 217-1, Fixed Radio Systems; Characteristics and requirements for point-to-point equipment and antennas; Part1: Overview, common characteristics and system-dependent requirements,» 2016.
- [5] ETSI, «EN 302 217-2, Fixed Radio Systems; [...] Part 2: Digital systems operating in frequency bands from 1.3 GHz to 86 GHz; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU,» 2016.
- [6] ETSI, «Fixed Radio Systems; [...] Part 4: Antennas,» 2017.
- [7] Journal Officiel de l'Union Européenne, «Directive 2014/53/UE du Parlement Européen et du Conseil du 16 avril 2014 relative à l'harmonisation des législations des Etats membres concernant la mise à disposition sur le marché d'équipements radioélectriques et abrogeant la directive 1999/5/CE».
- [8] EN 50385:2017, «Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz - 100 GHz), when placed on the market,» 2017.
- [9] EN 50401:2017, «Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz - 100 GHz), when put into service,» 2017.
- [10] IEC EN 62232:2017, «Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,» 2017.
- [11] ETSI Technical Report 102 457, «Fixed Radio Systems; Evaluation of the ElectroMagnetic Field (EMF) radiated by Line-of-Sight (LOS) fixed radio stations using parabolic dish directional antennas,» 2018.
- [12] C. A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, Wiley, 2016.

- [13] ANFR, «Guide Technique, Modélisation des sites radioélectriques et des périmètres de sécurité pour le public,» Version 6, Octobre 2019.
- [14] ANFR, «Protocole de mesure, Documentation de référence ANFR/DR 15-4.1,» Version 4.1, Octobre 2019.
- [15] «Les stations radioélectriques,» République Française, Décembre 2020. [En ligne]. Available: <http://www.radiofrquences.gouv.fr/les-stations-radioelectriques-a84.html>.