



INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL ET DES RISQUES

EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Rapport

Ministère de l'écologie et du développement durable

D. CHARPENTIER

*Laboratoire d'Evaluation des Equipements Electriques
Direction de la Certification*

Décembre 2002

EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES



RAPPORT

Ministère de l'écologie et du développement
durable

DECEMBRE 2002

D. CHARPENTIER

Avertissement

L'objectif de ce rapport est de présenter les différents matériels et méthodes de mesure des champs électromagnétiques, puis d'examiner les différents facteurs d'incertitude.

Ce rapport n'est pas un protocole de mesure, et ne saurait donc être considéré comme tel. Il s'appuie sur le protocole de mesure in situ établi sous la responsabilité de l'ANFR (Agence nationale des fréquences) qui vise à vérifier, pour les stations fixes, le respect des limitations en terme de niveaux de référence de l'exposition du public aux champs électromagnétiques prévues par le décret n°2002-775 du 3 mai 2002 . Ce protocole a régulièrement évolué depuis 2002 ; la dernière version référencée au *Journal officiel* est à ce jour (25 janvier 2007) la version DR15 V2.1.

Ce document comporte 45 pages (hors couverture et annexes).

RESUME

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Dominique CHARPENTIER	René de SEZE	Bernard PIQUETTE
Qualité	Responsable d'Unité Direction de la Certification	Direction des risques chroniques	Directeur Adjoint Direction de la Certification
Visa			

Devant l'inquiétude du public sur les éventuels risques liés aux rayonnements électromagnétiques, il est nécessaire d'étudier la métrologie des champs afin de définir des méthodes reproductibles et fiables permettant de caractériser les émissions radiofréquences.

L'objectif de ce rapport est de présenter les différents matériels et méthodes de mesure des champs électromagnétiques, puis d'examiner les différents facteurs d'incertitudes dans le but d'évaluer la conformité d'un site à la recommandation européenne sur l'exposition du public aux rayonnements électromagnétiques (99 /519/CE)

La description des différents matériels met en évidence une complémentarité :

- Les sondes de mesures de champs sont peu sensibles et très peu sélectives (elles captent toutes les émissions radiofréquences), mais permettent des mesures sur site à proximité des antennes.
- Les analyseurs de spectre sont plus précis et plus sélectifs, mais les antennes de réception associées ne permettent pas de mesurer facilement à proximité des antennes d'émission.

L'incertitude de mesures est fonction de nombreux facteurs :

Environnementaux

- Le type d'antenne
- Les réflexions des ondes sur le sol
- La hauteur de l'antenne de mesure par rapport au sol
- La polarisation de l'onde
- La multiplicité des sources d'émission
- La modulation et le débit des communications

Instrumentaux

La linéarité des appareils de mesures

L'étalonnage

La température

L'incertitude totale peut être estimée à 6,9 dB avec une sonde de mesure de champ et de 5,6 dB avec un analyseur de spectre.

Un exemple de caractérisation d'un site équipé d'une antenne de station de base de radiotéléphone est présenté.

SUMMARY

The main objective of this research is to ensure that public have access to comprehensive information on their exposure. It is necessary to define a procedure for demonstrating compliance with electromagnetic field exposure to European recommendation (99/519/EC).

Firstly analysing measurement errors, for example : influence of antenna pattern, reflection and diffraction effects, influence of other radiofrequency emitters.

Secondly, specifying type of instrumentation to be used. The previous studies showed that a wide frequency response sensor can introduce errors, and it's better to use a spectrum analyser. But field is a vector, and generally antennas, connected to a spectrum analyser, are polarised, so that it introduces measurements errors.

In the vicinity of the base station, both instruments should be used (isotropic wide band sensor and spectrum analyser), according to environment and site conditions.

Thirdly we begin research on dosimetric measurements for people living in the vicinity of base stations.

INERIS develops test procedures and carries out assessment for improving the measurement method.

Also procedure measurement should include this topic:

- Map of site,*
- Other emitters,*
- Vector effects,*
- Polarisation*
- Spatial measurements. How integrate field reflections near antenna?*
- Traffic communication effects, measurement fields varied over a 24 hours period.*

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	5
2. LES GRANDEURS À MESURER POUR ÉVALUER LES RISQUES DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES	5
2.1 Les seuils definis dans la recommandation europeenne 99-519-CE	6
2.1.1 Restrictions de base	7
2.1.2 Niveaux de référence	9
3. LES MATÉRIELS DE MESURE DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNÉTIQUES	12
3.1 Les différents types d'appareils de mesure	12
3.1.1 Les Antennes	13
3.1.2 La détection et les sondes de mesures	14
3.1.3 Les dispositifs de mesures	16
4. LE CHOIX DE LA CHAÎNE DE MESURE ET LES FACTEURS INFLUENTS	19
4.1 Facteurs environnementaux	19
4.1.1 L'influence du type d'antenne de réception et sa proximité par rapport à l'antenne d'émission.	19
4.1.2 Détermination de la zone du champ homogène	21
4.1.3 L'influence des réflexions multiples sur le sol et les objets environnants	22
4.1.4 L'influence de la hauteur de l'antenne de mesure par rapport au sol	23
4.1.5 L'influence de la multiplicité des sources d'émission	25
4.1.6 L'influence de la modulation et du débit des communications	26
4.2 Facteurs d'incertitudes associés aux matériels de mesures	27
4.2.1 Sensibilité d'un capteur de champ à l'autre composante de l'onde électromagnétique.	27
4.2.2 Linéarité de l'appareil et réponse en fréquence	28
4.2.3 Influence de la température et de l'humidité	29
4.2.4 Etalonnage des matériels	30
4.2.5 Etalon Secondaire	31
5. CALCUL DE L'INCERTITUDE DE MESURE	33
5.1.1 Composants contribuant à l'incertitude d'une mesure de champ électromagnétique	34
5.2 Synthèse des sources d'incertitudes et moyens de les reduire	38
6. CARACTERISATION DES STATIONS DE BASES DE RADIOTELEPHONIE	38
6.1 Exemple, cas d'un emetteur GSM sur un bâtiment	41
7. NORMALISATION ET REGLEMENTATION	44

1. INTRODUCTION

Devant l'inquiétude du public sur les éventuels risques liés aux rayonnements électromagnétiques, il est nécessaire d'étudier la métrologie des champs afin de définir des méthodes reproductibles et fiables de caractérisation des émetteurs radiofréquences. Cette étude permettra de déterminer les zones potentiellement à risques (proximité de machines industrielles rayonnantes) et de renseigner les populations faiblement exposées (proximité des stations de base de radiotéléphones) en leur fournissant des données fiables et objectives.

Les thèmes abordés dans ce rapport sont :

- Les seuils de risques définis dans la recommandation européenne 1999/519/CE,
- La métrologie des champs électromagnétiques (description des matériels, sources d'erreurs et calcul d'incertitude),
- La méthodologie de qualification d'un site source d'émission électromagnétiques (cas d'une station de base).

2. LES GRANDEURS A MESURER POUR EVALUER LES RISQUES DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Dans le cadre de l'exposition aux champs électromagnétiques, huit grandeurs physiques sont couramment utilisées :

- *le courant de contact* (I_c) entre une personne et un objet est exprimé en ampère (A). Un objet conducteur dans un champ électrique peut être chargé par ce champ,
- *la densité de courant* (J) est définie comme le courant traversant une unité de surface perpendiculaire au flux de courant dans un volume conducteur tel que le corps humain ou une partie du corps, exprimée en ampère par m^2 (A/m^2),
- *l'intensité de champ électrique* est une grandeur vectorielle (E) qui correspond à la force exercée sur une particule chargée, indépendamment de son déplacement dans l'espace. Elle est exprimée en volt par mètre (V/m),
- *l'intensité de champ magnétique* est une grandeur vectorielle (H) qui, avec l'induction magnétique, définit un champ magnétique en tout point de l'espace. Elle est exprimée en ampère par mètre (A/m),
- *l'induction magnétique (densité de flux magnétique)* est une grandeur vectorielle (B) définie en terme de force exercée sur des charges circulantes, et elle est exprimée en teslas (T). En espace libre et dans les milieux biologiques, l'induction magnétique et l'intensité de champ magnétique peuvent être utilisées indifféremment selon l'équivalence $1 \text{ Am}^{-1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$,
- *la densité de puissance* (S) est la grandeur appropriée utilisée pour des hyperfréquences lorsque la profondeur de pénétration dans le corps est faible. Il s'agit du quotient de la puissance rayonnée incidente perpendiculaire à une surface par l'aire de cette surface ; elle est exprimée en watts par m^2 (W/m^2).

- *l'absorption spécifique (AS) de l'énergie* est définie comme l'énergie absorbée par une unité de masse de tissus biologiques et est exprimée en joules par kilogramme (J/kg). Elle est utilisée pour limiter les effets non thermiques des rayonnements micro-ondes pulsés,
- *le débit d'absorption spécifique (DAS) de l'énergie* moyennée sur l'ensemble du corps ou sur une partie quelconque du corps est défini comme le débit avec lequel l'énergie est absorbée par unité de masse du tissu du corps et elle est exprimée en watts par kilogramme (W/kg). Le DAS "corps entier" est une mesure largement acceptée pour établir le rapport entre les effets thermiques et l'exposition aux radiofréquences. En complément du DAS moyenné sur le corps entier, des valeurs de DAS local sont nécessaires pour évaluer et limiter un dépôt excessif d'énergie dans des petites parties du corps résultant de conditions d'exposition spéciales.

Parmi ces grandeurs, l'induction magnétique, les courants de contact, les intensités de champs électriques et magnétiques et la densité de puissance peuvent être mesurés directement.

Il n'est pas suffisant de mesurer des grandeurs électriques (puissance, champ électromagnétique) pour évaluer le débit d'absorption spécifique qui est fonction de la puissance absorbée par l'utilisateur. Ainsi pour un téléphone portable, environ 40 % de l'énergie émise est absorbée par la tête. La puissance absorbée décroît exponentiellement en fonction de la profondeur par rapport à celle existante en surface, le débit d'absorption (DAS) est donc très variable dans la tête (70 % de l'énergie est absorbée dans un volume de 5 cm de coté). Le DAS sous cutané s'exprime sous la forme :

$$DAS = \frac{\sigma \cdot E_{int}^2}{\rho}$$

avec : σ conductivité des tissus biologiques (1 Siemens à 900 MHz)

ρ masse volumique (de l'ordre de 1000 kg/m³)

E_{int} est le champ électrique interne en surface

2.1 LES SEUILS DEFINIS DANS LA RECOMMANDATION EUROPEENNE 99-519-CE

Il convient de faire une distinction entre restrictions de base et niveaux de référence pour l'évaluation des effets éventuels des rayonnements sur la santé.

Les restrictions de base et les niveaux de référence ont été déterminés après avoir passé soigneusement en revue toute la documentation scientifique publiée; seuls les effets avérés ont été retenus pour fonder les propositions de restrictions en matière d'exposition. L'induction du cancer en tant que risque d'une exposition à long terme n'a pas été établie. Toutefois un coefficient de sécurité d'environ 50 entre les valeurs seuils pour l'apparition d'effets aigus et les valeurs de restrictions de bases devrait couvrir implicitement les effets éventuels à long terme.

2.1.1 Restrictions de base

Les restrictions concernant l'exposition à des champs électriques et magnétiques, variables dans le temps, sont fondées sur des effets avérés sur la santé. En fonction de la fréquence du rayonnement, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier ces restrictions sont l'induction magnétique (B), la densité de courant (J), le débit d'absorption spécifique de l'énergie (DAS) et la densité de puissance (S). L'induction magnétique et la densité de puissance peuvent être aisément mesurées sur les sujets exposés.

Les grandeurs physiques suivantes (grandeurs mesurant la dose ou l'exposition) sont utilisées pour définir les restrictions de base concernant les champs électromagnétiques en fonction de la fréquence du rayonnement:

- entre 0 et 1 Hz, des restrictions de base sont prévues pour l'induction magnétique concernant les champs magnétiques statiques (0 Hz) et la densité de courants pour les champs variables dans le temps jusqu'à 1 Hz, afin de prévenir des effets sur le système cardio-vasculaire et le système nerveux central ;
- entre 1 Hz et 10 MHz, des restrictions de base sont prévues pour la densité de courants afin de prévenir des effets sur les fonctions du système nerveux ;
- entre 100 kHz et 10 GHz, des restrictions de base concernant le DAS sont prévues pour prévenir un stress thermique généralisé du corps et un échauffement localisé excessif des tissus. Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kHz et 10 MHz, des restrictions sont prévues concernant à la fois la densité de courants et le DAS ;
- entre 10 GHz et 300 GHz, des restrictions de base concernant la densité de puissance sont prévues pour prévenir un échauffement des tissus à la surface du corps ou à proximité de cette surface.

Les restrictions de base, figurant au tableau ci-dessous, sont fixées de manière à tenir compte d'incertitudes liées à la sensibilité personnelle, aux conditions environnementales, et de la diversité de l'âge et de l'état de santé du public.

Gamme des fréquences	Induction magnétique (mT)	Densité de courant S (mA/m ²) (valeur efficace)	Moyenne DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	Densité de puissance S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0 - 1 Hz	-	8	-	-	-	-
1 - 4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4 - 1 000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 000 Hz - 100 kHz	-	f/500	-	-	-	-
100 kHz - 10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz - 10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10 - 300 GHz	-	-	-	-	-	10

Restrictions de base pour les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (0 Hz-300 GHz)

Notes :

- f est la fréquence en Hz,
- La restriction de base sur la densité du courant doit protéger contre les effets aigus de l'exposition sur les tissus du système nerveux central au niveau de la tête et du tronc et inclut un coefficient de sécurité. Les restrictions de base pour les champs de fréquences extrêmement basses (EBF) sont basées sur les effets nocifs avérés sur le système nerveux central. Ce type d'effets aigus est essentiellement instantané, et d'un point de vue scientifique, il n'y a aucune raison de modifier les restrictions de base pour les expositions de courte durée. Toutefois, puisque la restriction de base est fondée sur les effets nocifs sur le système nerveux central, elle peut permettre des densités de courant plus élevées dans les tissus corporels autres que le système nerveux central dans les mêmes conditions d'exposition.
- En raison de l'hétérogénéité électrique du corps, la valeur moyenne des densités de courants doit être évaluée sur une section de 1 cm² perpendiculaire à la direction du courant.
- Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de crête de densité du courant peuvent être obtenues en multipliant la valeur efficace par $\sqrt{2}$ (~1,414). Pour des impulsions de durée t_p la fréquence équivalente à appliquer dans les restrictions de base devrait être calculée selon la formule $f = 1/(2t_p)$.
- Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz et pour des champs magnétiques pulsés, la densité maximale de courant associée aux impulsions peut être calculée à partir des temps de montée/descente et de la vitesse maximale de fluctuation de l'induction magnétique. La densité de courants induits peut alors être comparée avec la restriction de base appropriée.
- Toutes les valeurs moyennes de DAS doivent être mesurées sur un intervalle de temps de six minutes.
- La masse retenue pour évaluer le DAS moyen localisé est de 10 g de tissu contigu. La DAS maximal ainsi obtenu doit être la valeur utilisée pour l'estimation de l'exposition. En précisant qu'il doit s'agir d'une masse de tissu contigu, on reconnaît que ce concept peut être utilisé dans la dosimétrie informatique, mais peut présenter des difficultés pour les mesures physiques directes. Une simple masse de tissu de forme cubique peut être utilisée, à condition que les grandeurs dosimétriques calculées aient des valeurs plus prudentes que celles données dans les recommandations.
- Pour des impulsions de durée t_p , la fréquence équivalente à appliquer dans les restrictions de base devrait être calculée selon la formule $f = 1/(2t_p)$. En outre, pour les expositions pulsées, dans la gamme de fréquences comprises entre 0,3 et 10 GHz et pour l'exposition localisée de la tête, afin de limiter et d'éviter les effets auditifs provoqués par l'expansion thermoélastique, une restriction de base supplémentaire est recommandée. En l'occurrence, l'AS ne devrait pas dépasser 2 mJ kg⁻¹ en moyenne pour 10 grammes de tissu.

2.1.2 Niveaux de référence

Ces niveaux permettent de mesurer plus facilement l'exposition pour déterminer si les restrictions de base risquent d'être dépassées. Les grandeurs physiques sont l'intensité de champ électrique (E), l'intensité de champ magnétique (H), l'induction magnétique (B), la densité de puissance (S), les courants induits dans les extrémités (I_L), les courants de contact (I_C).

Le respect du niveau de référence garantira le respect de la restriction de base correspondante. Si la valeur mesurée est supérieure au niveau de référence, il n'en découle pas nécessairement un dépassement de la restriction de base. Dans de telles circonstances, néanmoins, il est nécessaire d'établir si la restriction de base est respectée.

Certaines grandeurs telles que l'induction magnétique (B) et la densité de puissance (S) constituent à la fois des restrictions de base et des niveaux de références à certaines fréquences.

Les niveaux de référence pour la limitation de l'exposition sont obtenus sur la base des restrictions de base pour le couplage maximal du champ avec l'individu exposé, ce qui fournit ainsi la protection maximale. Les niveaux de référence sont généralement destinés à constituer des valeurs moyennes dans l'espace par rapport à la dimension du corps de l'individu exposé, mais avec cette condition importante qu'il n'y ait pas de dépassement des restrictions de base localisées concernant l'exposition.

Dans certaines situations où l'exposition est fortement localisée, comme c'est le cas avec des téléphones portables, par rapport à la tête, l'utilisation des niveaux de référence n'est pas appropriée. Dans de tels cas, il convient d'évaluer directement la conformité par rapport à la restriction de base localisée.

Gamme de fréquences	E (V/m)	H (A/m)	B (μT)	Densité de puissance équivalente en onde plane Seq (W/m ²)
0 – 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1 – 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8 – 25 Hz	10 000	$4\,000/f$	$5\,000/f$	-
0,025 – 0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8 – 3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3 – 150 kHz	87	5	6,25	-
0,15 – 1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1 – 10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2 – 300 GHz	61	0,16	0,20	10

Niveaux de référence pour les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques [de 0 Hz - 300 GHz, valeurs efficaces (rms - root mean square/valeur quadratique moyenne) en champ non perturbé]

Notes :

- L'unité de f est celle indiquée dans la colonne de la gamme de fréquences.
- Pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 GHz, la valeur moyenne de S_{eq} , E^2 , H^2 et B^2 doit être mesurée sur un intervalle de temps de six minutes.
- Pour des fréquences supérieures à 10 GHz, la valeur moyenne de S_{eq} , E^2 , H^2 et B^2 doit être mesurée sur un intervalle de temps de $68/f^{1,05}$ minute (f est exprimée en GHz).
- Aucune valeur pour E n'est fournie pour des fréquences < 1 Hz qui constituent dans les faits des champs électriques statiques. Pour la plupart des personnes, il n'y a pas de perception gênante des charges électriques superficielles pour des intensités de champ inférieures à 25 kV/m. Il conviendrait d'éviter des décharges d'étincelles provoquant un stress ou une gêne.
- Pour les valeurs de crête, les niveaux de référence suivants s'appliquent pour le champ électrique E (V/m), et pour le champ magnétique H (A/m) et B (μ T) :
 - pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de référence de crête sont obtenues en multipliant les valeurs efficaces, (rms) correspondantes par $\sqrt{2}$ ($\sim 1,414$). Pour des impulsions de durée t_p , la fréquence équivalente à appliquer devrait être calculée selon la formule $f = 1/(2t_p)$;
 - pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de référence de crête sont obtenues en multipliant les valeurs efficaces (rms) correspondantes par :
 - 10^a , où $a = [0,665 \log(f/10^5) + 0,176]$, f étant exprimée en Hz,
 - pour des fréquences comprises entre 10 MHz et 300 GHz, les valeurs de référence de crête sont obtenues en multipliant les valeurs efficaces (rms) correspondantes par 32.
- Même si l'on ne dispose que de peu d'informations concernant la relation entre les effets biologiques et les valeurs de crête des champs pulsés, il y a lieu de penser que, pour des fréquences supérieures à 10 MHz, la valeur moyenne de densité de puissance équivalente (S_{eq}) pour la durée de l'impulsion ne devrait pas dépasser 1 000 fois les niveaux de référence ou que les intensités de champ ne devraient pas dépasser 32 fois les niveaux de référence.

Pour des fréquences comprises entre environ 0,3 GHz et plusieurs GHz et pour l'exposition localisée de la tête, afin de limiter les effets auditifs provoqués par l'expansion thermoélastique, il faut impérativement limiter l'absorption spécifique des impulsions.

Dans cette gamme de fréquences, l'AS seuil de 4 à 16 mJ kg⁻¹ produisant cet effet, correspond, pour des impulsions de 30- μ s, à des valeurs de crête du DAS de 130 à 520 W kg⁻¹ dans le cerveau. Entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de crête pour les intensités de champ sont obtenues par interpolation entre 1,5 fois la valeur de crête à 100 kHz et 32 fois celle à 10 MHz.

Courants de contact et courants induits dans les membres

Pour les fréquences jusqu'à 110 MHz, des niveaux de référence supplémentaires sont recommandés pour éviter les dangers dus à des courants de contact.

Les niveaux de référence des courants de contact sont représentés dans le tableau ci-dessous. Les niveaux de référence pour les courants de contact sont fixés pour tenir compte du fait que les courants de contact seuil qui induisent des réactions biologiques chez les femmes adultes et les enfants correspondent respectivement aux deux tiers et à la moitié des seuils observés pour les hommes adultes.

Gamme de fréquences	Courant de contact maximal (mA)
0 Hz - 2,5 kHz	0,5
2,5 kHz - 100 kHz	0,2 f
100 kHz - 110 MHz	20

*Niveaux de référence pour les courants de contact d'objets conducteurs
(f exprimée en kHz)*

Pour la gamme de fréquences comprise entre 10 MHz et 110 MHz, un niveau de référence de 45 mA pour le courant traversant un membre est recommandé.

Il s'agit de limiter le DAS localisé sur un intervalle de temps de six minutes.

3. LES MATERIELS DE MESURE DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNETIQUES

Seul les matériels adaptés à vérifier les valeurs limites correspondant aux niveaux de références sont présentés. La description des matériels d'évaluation du débit d'absorption fera l'objet d'un autre rapport.

Il est nécessaire de préciser au préalable deux particularités du champ électromagnétique :

- Le champ électromagnétique est **une grandeur vectorielle**. L'amplitude du champ résultant est la somme quadratique des composantes du champ :

$$|E| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2 + |E_z|^2}$$

- Il ne peut être comparé à un champ de référence, comme c'est le cas d'une longueur. Une antenne capte un champ et le convertit en grandeur électrique à ces bornes (tension ou courant). La détermination du champ s'obtient en faisant le produit de la mesure électrique par le facteur d'antenne. Le facteur d'antenne ne peut être déterminé intrinsèquement, il est calculé ou mesuré par comparaison avec une autre antenne dont on connaît le facteur théorique.

Le champ électrique s'exprime sous la forme (en dBV/m) :

$$E_{\text{dBV/m}} = F_{\text{dB(m}^{-1})} + V_{\text{dBV}} + P_{\text{c dB}}$$

Le champ magnétique s'exprime sous la forme (en dBA/m) :

$$H_{\text{dBA/m}} = F_{\text{dB(m}^{-1})} + V_{\text{dBV}} + P_{\text{c dB}} - 20\log(377)$$

avec : F : Facteur d'antenne

V : Tension moyenne efficace

Pc : Pertes des câbles

3.1 Les différents types d'appareils de mesure

Un appareil de mesure de densité de puissance ou de champ RF comporte en général **une sonde, des conducteurs et un dispositif de mesure**.

La sonde sert à détecter le champ. Il peut s'agir d'une antenne traditionnelle ou d'un autre type de détecteur. Le rendement et les applications de l'appareil de mesure, dans son ensemble, sont largement tributaires de la conception et des caractéristiques de la sonde.

Les conducteurs transmettent le signal détecté au dispositif de mesure. Pour réduire le couplage des conducteurs avec le champ avoisinant et ainsi réduire au minimum les perturbations, les conducteurs sont des fils à haute résistance.

Le dispositif de mesure sert essentiellement à traiter et à afficher les données d'intensité de champ captées. L'appareil de mesure RF peut être à large bande ou à bande étroite. Un appareil à large bande réagit uniformément à une vaste gamme de fréquences et ne nécessite aucun réglage d'accord. Un appareil à bande étroite peut lui aussi fonctionner sur une vaste gamme de fréquences; cependant, la largeur de bande à tout moment est limitée, et l'appareil doit être accordé sur la fréquence recherchée. Les appareils à large bande et à bande étroite ont leurs avantages et inconvénients propres, selon l'environnement spectral et la nature de mesures projetées.

3.1.1 Les Antennes

Antenne passive

Le capteur de champ le plus simple est constitué d'une antenne passive.

La plus simple des antennes est un dipôle accordé en $\lambda/2$ (λ étant la longueur d'onde).

$$\lambda = 3 \cdot 10^8 / f, f \text{ étant la fréquence en Hz (pour une propagation dans l'air)}$$

Calcul simplifié de la puissance électrique aux bornes d'une antenne dipôle $\lambda/2$

La puissance captée par une antenne s'exprime sous la forme :

$$Pr = \frac{E^2}{120 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot G \text{ en W}$$

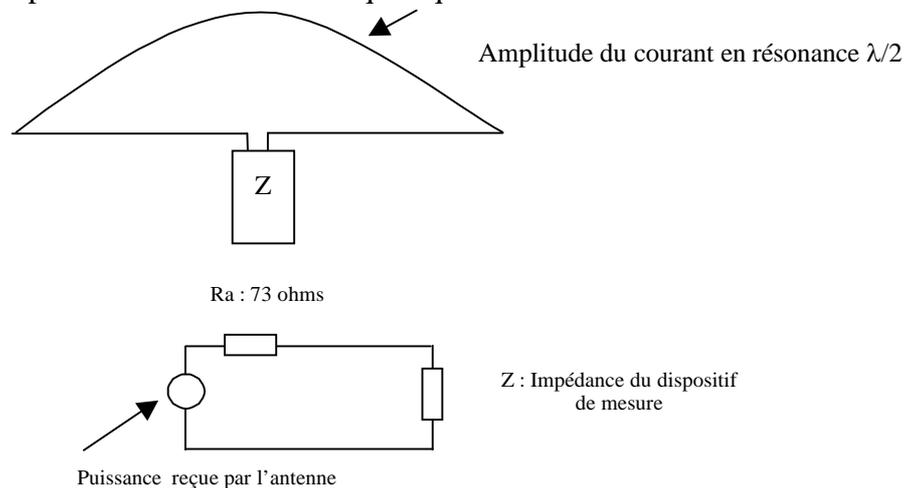
avec

λ : longueur d'onde

E : champ électrique

G : gain du dipôle (1,64 pour un dipôle $\lambda/2$)

L'antenne en réception a un schéma électrique équivalent à :



La résistance de rayonnement d'un dipôle $\lambda/2$ à la résonance (R_a) éloignée du sol tend vers 73 ohms.

$$Pr = (R_a + Z) \cdot I^2$$

Le courant haute fréquence induit dans le dispositifs de mesure s'exprime sous la forme :

$$I = E \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{G}{(R_a + Z) \cdot 120 \cdot \pi}}$$

Antenne active

Il est difficile de fabriquer des sondes de champs E et H à large bande précises, qui couvrent la région des grandes longueurs d'onde (1000 m soit 300 KHz) en faisant appel aux moyens traditionnels exposés ci-dessus. Pour obtenir une réponse en fréquence uniforme et une sensibilité suffisante dans une sonde à dipôle, l'impédance de charge combinée du détecteur et du conducteur haute impédance élevée doit être supérieure à l'impédance de l'antenne (source).

Une solution est de connecter un amplificateur RF à impédance élevée qui sert de charge directement à une antenne filaire (unipolaire ou cadre). Cette solution est utilisée pour les fréquences comprises entre 10 kHz et plusieurs centaines de MHz. Les sondes commercialisées de champs magnétiques et électriques qui utilisent des composants électroniques actifs fonctionnent à des fréquences très basses (50 Hz).

De plus les sondes sans composants électroniques actifs sont perturbées par les conducteurs porteurs de signaux de l'ensemble antenne-détecteur. Ce problème peut devenir important aux fréquences en dessous de 10 MHz. Cette situation est due au fait que les conducteurs servent de filtres passe-bas et qu'ils ont de plus en plus de difficulté à séparer le signal détecté (basse fréquence) du champ radiofréquence mesuré, à mesure que les deux fréquences se rapprochent. Cela produit une sensibilité excessive et des diagrammes de rayonnement médiocres dans les sondes passives.

Enfin, à des fréquences supérieures à environ 300 MHz, en présence de conditions de rayonnements « en espace libre », le détecteur et le boîtier de métal de l'appareil de contrôle peuvent être exposés à des niveaux RF comparables, et la diffusion provoquée par le boîtier du détecteur (sonde) peut entraîner d'importantes erreurs.

Mesureur du courant de déplacement

En plus des antennes unipolaires et des dipôles, on peut réaliser un condensateur à plaques parallèles, nommé détecteur de courant de déplacement, pour mesurer les champs électriques perpendiculaires à une grande surface conductrice. Les appareils conçus pour mesurer les champs des terminaux d'affichage vidéo s'inspirent du principe du détecteur de courant de déplacement.

Les détecteurs de courant de déplacement sont généralement utilisés à des fréquences des gammes LF et VLF (de 0 Hz à quelques centaines de kHz), ils peuvent cependant être utilisés efficacement à des fréquences pouvant atteindre plusieurs centaines de MHz.

3.1.2 La détection et les sondes de mesures

Les sondes de mesure ont pour fonction la détection de signal, elles transforment un signal radiofréquence en un signal continu (tension - courant) proportionnel. Les sondes sont constituées de composants électroniques à semiconducteurs. Il existe des appareils intégrés qui regroupent le capteur, la sonde et l'unité de traitement, ce qui supprime les câbles de liaisons et donc les sources d'être perturbées.

Redresseurs à diodes

Les éléments d'antennes (dipôles courts ou antennes cadres) et diodes multiples sont agencés selon une configuration convenable, pour faire la somme des trois composantes spatiales du champ, indépendamment de la polarisation et de l'angle d'incidence. Il faut réunir trois éléments dans un agencement orthogonal pour obtenir un appareil isotrope qui peut être utilisé selon n'importe quelle orientation par rapport au champ. Les dipôles réagissent au champ électrique et les antennes cadres, au champ magnétique. Pour assurer une réponse uniforme dans la gamme de fréquences voulue, la taille du dipôle ou de l'antenne cadre doit être faible par rapport à la longueur d'onde de la plus grande fréquence à mesurer.

En règle générale, les diodes Schottky présentent un certain effet photovoltaïque et peuvent donc produire des résultats erronés quand elles sont frappées par la lumière du jour ou par un fort éclairage incandescent. Les diodes hybrides à connexion portante présentent un effet photovoltaïque beaucoup plus important, il faut donc prévoir une encapsulation optiquement opaque pour éliminer cet effet.

Les appareils à diodes sont **non linéaires par rapport à l'intensité du champ** :

- à des niveaux faibles, la tension redressée est proportionnelle à E^2 (ou H^2),
- à des niveaux élevés la tension redressée devient proportionnelle à E (ou à H).

En raison de ce changement de caractéristique, la plage de fonctionnement de la diode doit être limitée à des niveaux faibles, pour donner une indication vraie de E^2 ou de H^2 .

Quand les diodes sont utilisées à des niveaux plus élevés, il faut modifier la tension de sortie de chacun des composants (généralement en les mettant au carré) avant d'en faire la sommation.

Quand ils sont utilisés pour la mesure de champs pulsés, les appareils à diodes deviennent des dispositifs de détection de crête, plutôt que des valeurs moyennes; par conséquent, les erreurs de mesure peuvent être importantes dans les champs où le rapport entre valeur de crête et valeur moyenne est élevé.

Quand un appareil à diodes est adapté à un fonctionnement en large bande, sa gamme supérieure de fréquences se situe actuellement au-dessus de 12 GHz. La limite de fréquence inférieure est au-dessous de 400 kHz. Les caractéristiques de claquage peuvent être de l'ordre de centaines de mW/cm^2 .

Selon leur conception, les détecteurs à diodes peuvent être sensibles à la température. Les variations à la sortie dues à la température ambiante sont généralement inférieures à 0,05 dB par °C. Les appareils à diodes peuvent aussi être sensibles à la modulation si la région quadratique est dépassée, ce qui entraîne des erreurs selon le type de modulation.

Thermocouples

Les éléments de détection sont des jonctions thermoélectriques de type métal-métal à couche mince. Il est possible de réunir les deux fonctions (antenne et détection) en réalisant un thermocouple dont des éléments de la couche assurent des fonctions d'antenne.

Certaines sondes en basse fréquence utilisent également des antennes cadres terminées par des détecteurs thermocouples.

La tension continue de sortie du thermocouple est proportionnelle au carré de l'intensité du champ électrique.

La principale limite des mesureurs de rayonnement à thermocouples est la tension de claquage. Des couches minces résistives offrent une très grande largeur de bande.

Détecteurs optoélectroniques

C'est un détecteur passif non métallique (modulateur électro-optique) ayant une réponse très large bande (de 0 Hz à 20 GHz), qui convertit les données d'intensité de champ électromagnétique en modulation instantanée d'un faisceau laser. L'énergie laser est transmise par fibre optique à un modulateur. Celui-ci module en amplitude le faisceau laser, de façon proportionnelle à l'amplitude instantanée du champ électromagnétique RF auquel le modulateur est exposé. Du modulateur, le faisceau laser modulé en amplitude est alors transmis à un photodétecteur qui convertit le faisceau optique modulé en un signal électrique représentant l'amplitude instantanée de l'intensité du champ RF. Ce signal est détecté, traité et affiché.

Ce système a été utilisé en association avec des dipôles de faible longueur électrique, qui servent de détecteur de champ électrique, de même que sans antenne (le modulateur électro-optique lui-même servant alors de détecteur de champ électrique). En outre, on peut connecter des antennes traditionnelles à un modulateur électro-optique commercial à l'aide d'un conducteur court, pour fournir une liaison RF passive non métallique avec l'antenne.

Détecteurs mixtes de champs électriques et magnétiques

Les appareils décrits précédemment font appel à des sondes distinctes pour mesurer les composantes des champs électriques et magnétiques. Dans la région de champ proche d'une source RF, les valeurs relatives des champs électriques et magnétiques varient considérablement l'une par rapport à l'autre, selon la distance à la source.

En outre, les champs peuvent varier rapidement dans le temps. Pour mesurer l'intensité des champs électriques et magnétiques qui varient dans le temps et dans l'espace, il faut installer une sonde de champ électrique, puis une sonde de champ magnétique exactement au même point. Cependant, étant donné que le champ à l'étude peut changer pendant la durée limitée qui s'écoule entre l'exécution de mesures successives, il en résulte une incertitude de mesure.

On peut réaliser un système de sondes isotropes à large bande pour mesurer simultanément les champs électriques et magnétiques à l'aide d'un jeu de trois dipôles mutuellement orthogonaux et d'un jeu de trois antennes cadres mutuellement orthogonales qui sont physiquement installées dans un volume très faible (par rapport à la plus petite longueur d'onde). Étant donné que la longueur des dipôles ou le diamètre des antennes cadres sont faibles pour obtenir une réponse en fréquence uniforme, les champs électriques captés par les antennes cadres seront négligeables.

Par conséquent, le couplage mutuel entre les différents composants de la sonde est réduit au minimum grâce à l'utilisation d'antennes de faible longueur électrique. Des détecteurs faisant appel à des thermocouples ou à des diodes quadratiques sont utilisés pour fournir un signal aux circuits électroniques qui effectuent la sommation, la conversion ou le traitement des données.

3.1.3 Les dispositifs de mesures

Analyseurs de spectre

Les analyseurs de spectre sont essentiellement des récepteurs accordables dont la largeur de bande de réception peut être réglée sur une large gamme de fréquences. Ils servent à mesurer la puissance aux bornes de l'antenne, à la fréquence ou aux fréquences sélectionnées. S'ils sont utilisés de pair avec une antenne sélective à bande étroite, ils s'apparentent, en principe, à un mesureur de champ. Par contre, les analyseurs de spectre peuvent également être

connectés à des antennes relativement courtes pour produire une réponse large dans une gamme de fréquences données. Dans ce cas, les analyseurs affichent le spectre des signaux ambiants, ce qui permet d'établir les fréquences présentes et leur apport relatif à la densité de puissance globale.

Mesureurs de champs électriques - magnétiques et de densité de puissance

Les mesureurs de champs électriques ou magnétiques sont des systèmes composés d'une antenne, d'un détecteur et d'un dispositif d'affichage. Ils font appel à différents types d'antennes (unipolaires, dipôles, cadres, log-périodiques, biconiques, cornets ou réflecteurs paraboliques), le détecteur peut être non sélectif comme les détecteurs à diodes ou sélectif comme les analyseurs de spectre.

Les mesureurs de densité de puissance sont souvent des appareils ayant une sonde isotrope à large bande sensible au champ, la densité est en général le résultat d'un calcul s'appuyant sur l'intensité du champ.

Les mesures effectuées au moyen d'un mesureur peuvent produire des résultats erronés quand les câbles de raccordement sont alignés par mégarde avec le champ électrique. En effet, les conducteurs qui acheminent les signaux forment une antenne plus efficace aux basses fréquences (fréquences de la bande de radiodiffusion AM) que les courts dipôles de la sonde.

Mesureurs de courant induit

Les mesureurs de courant induit affichent le niveau de courant induit circulant dans le corps vers le sol quand une personne est debout dans un champ électrique produit par un émetteur de forte puissance. Ces courants peuvent donner une indication de l'énergie absorbée par le corps.

Les mesureurs de courant induit sont généralement des appareils sur lesquels on se tient debout, qui mesurent le courant induit produit par un champ électrique. La plaque-socle sur laquelle on se tient est de fait un réseau condensateur/résistance composé de deux plaques en acier inoxydable. Le mesureur indique le courant circulant dans la résistance connectée entre les plaques de condensateur. La plaque-socle est normalement de faibles dimensions pour réduire au minimum le captage de champs électriques produits par les côtés de la plaque-socle.

Il existe des dispositifs qui mesurent directement le courant induit au moyen de pince ampère_métrique. En les disposant autour des membres, il est possible de mesurer le courant HF sur certaines parties du corps.

La gamme de fréquences de ces mesureurs commerciaux est de 10 kHz à 100 MHz.

Mesureurs de courant de contact

Les mesureurs de courant de contact affichent le niveau de courant circulant dans le corps suite à un contact avec un objet métallique conducteur situé près d'un émetteur haute puissance et qui se charge sous l'influence des champs émis (objet « chaud »)..

Les mesureurs de courant de contact comprennent normalement une sonde de contact isolée en contact avec l'objet « chaud », une plaque-socle en acier inoxydable et des circuits internes. Le courant ainsi mesuré simule le courant de décharge qui serait perçu par une personne pieds nus qui tiendrait l'objet métallique « chaud ». La gamme de fréquences de ces mesureurs est de 3 kHz à 30 MHz.

Réponse pondérée en fréquence

Les valeurs limites applicables à l'intensité de champ et à la densité de puissance dépendent de la fréquence. Les modèles de sonde qui font appel à des éléments diodes-dipôles séparément ou de pair avec des éléments à thermocouples peuvent être conçus de sorte que leurs caractéristiques de sensibilité par rapport à la fréquence soient à l'inverse de la norme. On peut ainsi faire la sommation et la pondération des signaux de fréquences multiples conformément à la norme de sécurité. Sur ces appareils, la lecture est exprimée en pourcentage de la norme.

Les sondes à réponse pondérée en fréquence ne couvrent parfois qu'une partie de la gamme de fréquences de la norme de sécurité. On peut utiliser des sondes supplémentaires qui se complètent et élargissent la plage de mesure. Quand on utilise des sondes complémentaires, celles-ci doivent rejeter les signaux hors bande.

4. LE CHOIX DE LA CHAÎNE DE MESURE ET LES FACTEURS INFLUENTS

Afin d'avoir une bonne reproductibilité et précision des mesures, nous analysons les différentes sources d'erreurs et d'incertitudes relatives aux différentes chaînes de mesures.

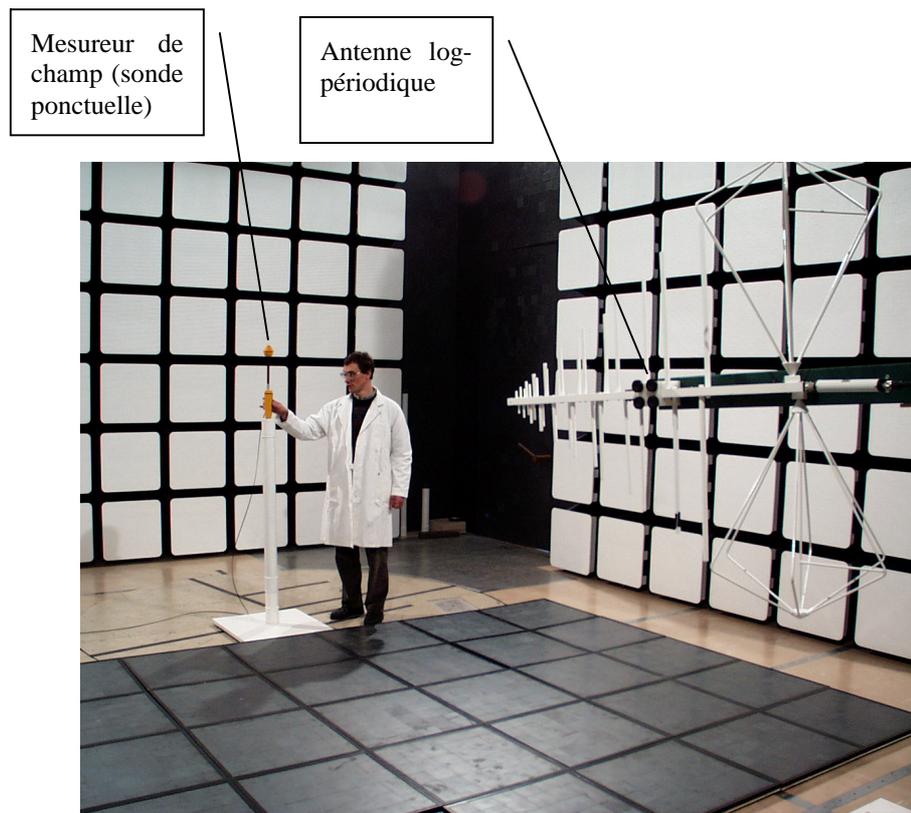
Deux types de facteurs influents sont à prendre en compte :

- L'environnement et les conditions d'utilisation des équipements de mesure. Le choix du dispositif de mesure par rapport à son environnement, sa mise en place sur site, les émissions parasites autres que celles à caractériser sont déterminantes dans la qualité des mesures. Il est primordial d'analyser ces facteurs externes avant de déterminer une chaîne de mesure.
- L'incertitude associée aux appareils de mesure.

4.1 FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

4.1.1 L'influence du type d'antenne de réception et sa proximité par rapport à l'antenne d'émission.

Nous avons comparé dans une cage de Faraday les résultats de mesure entre un analyseur de spectre connecté à une grande antenne de type « log-périodique » et un mesureur de champ ayant une sonde très petite de type détection par diodes.



Le graphe ci-dessous montre une différence importante pouvant atteindre 10 dB (facteur 3) à 1000 MHz (courbe *écart EMR 300-analyseur de spectre*).

Cette variation est principalement due à la nature du capteur et à la taille de l'antenne log-périodique (de l'ordre de 1,5 m) qui n'est pas négligeable lorsque celle-ci est à 3 m de l'antenne d'émission.

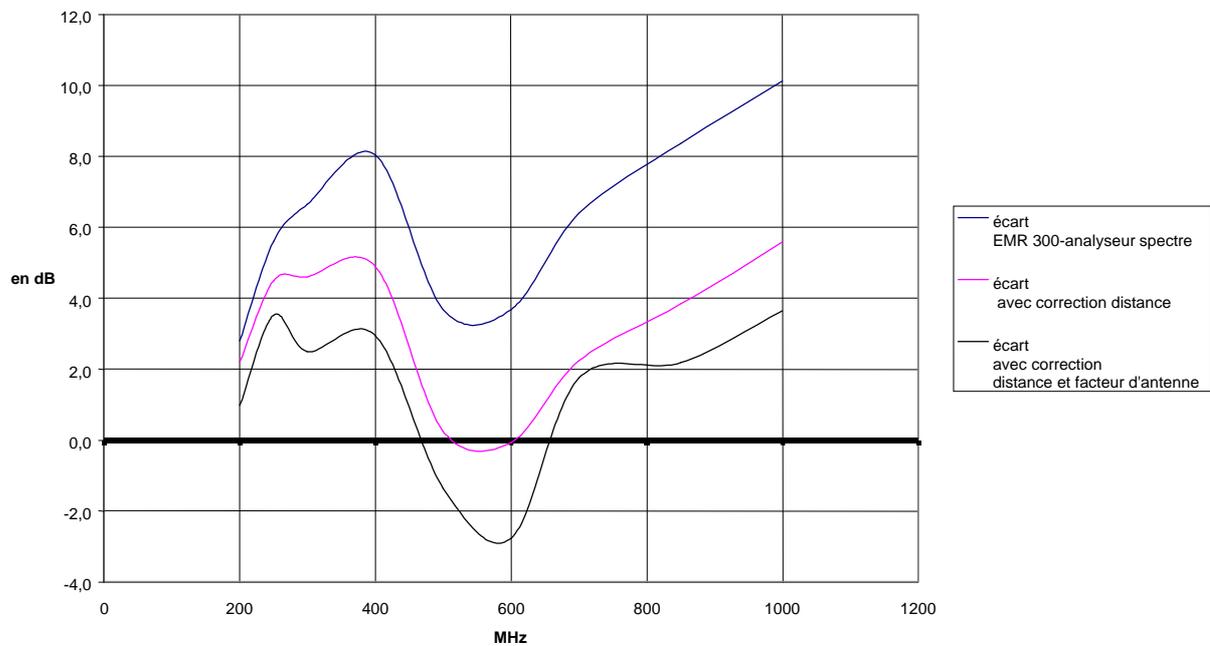
La courbe intitulée « *écart avec correction de distance* » prend en compte la distance réelle entre les dipôles pour chaque fréquence.

La courbe intitulée « *écart avec correction de distance et du facteur d'antenne* » prend en compte l'effet de la distance et partiellement de la polarisation du champ. La correction apportée consiste à distinguer le facteur d'antenne en polarisation verticale et horizontale. Le champ calculé est obtenu avec le facteur d'antenne en polarisation verticale alors que généralement cette distinction n'est pas réalisée. Nous aurions pu aussi prendre en compte la polarisation du champ reçu, en effet l'antenne d'émission émet un champ vertical qui par réflexion peut changer de polarisation. Le mesureur de champ somme les 3 composantes alors que l'antenne log-périodique n'est sensible qu'à la polarisation verticale.

Cet exemple montre bien la difficulté de mesurer un champ électromagnétique. Le mesureur de champ semble mieux adapté à une mesure ponctuelle, contrairement à la mesure avec l'analyseur de spectre qui intègre le champ dans l'espace. Toutefois le mesureur de champ a pour inconvénient son manque de sélectivité, l'intégration se fait alors sur la bande de fréquence.

Ceci met en évidence qu'il ne faut pas privilégier un matériel par rapport à un autre pour une mesure de champ, il faut choisir l'appareil le mieux adapté à la situation. Si possible une mesure avec les 2 matériels est souhaitable évitant ainsi les erreurs systématiques, en tenant compte qu'il est alors illusoire de vouloir avoir le même résultat avec les 2 matériels.

Comparaison entre un mesureur de champ et un analyseur de spectre



4.1.2 Détermination de la zone du champ homogène

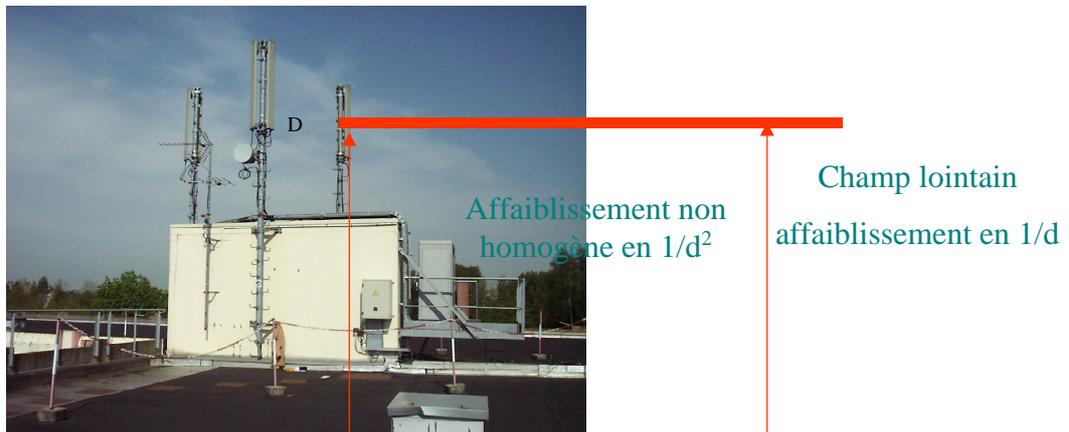
Le champ rayonné par une antenne n'est pas mesurable à proximité immédiate. Au plus proche de l'antenne d'émission, un couplage peut se produire entre les antennes (sonde et antenne d'émission), le capteur de la sonde modifie la valeur du champ rendant la mesure impossible.

En s'éloignant le champ devient mesurable, mais il n'est pas homogène, le champ électrique n'est pas orthogonal au champ magnétique (zone de Fresnel).

En champ lointain, la mesure d'une des composantes (électrique ou magnétique) est suffisante pour connaître toutes les caractéristiques du rayonnement. La formule suivante est appliquée pour un rayonnement dans l'air :

$$\frac{E}{H} = Z_0 = 377\Omega$$

Les distances définissant ces zones sont fonction de la fréquence et de la taille des antennes. Les distances sont indiquées sur la photo ci-dessous:



À 900 MHz et D=1,5m

$$\lambda = 0,33 \text{ m}$$

zone Réactive
 $\lambda/2\pi$ (0,05 m)

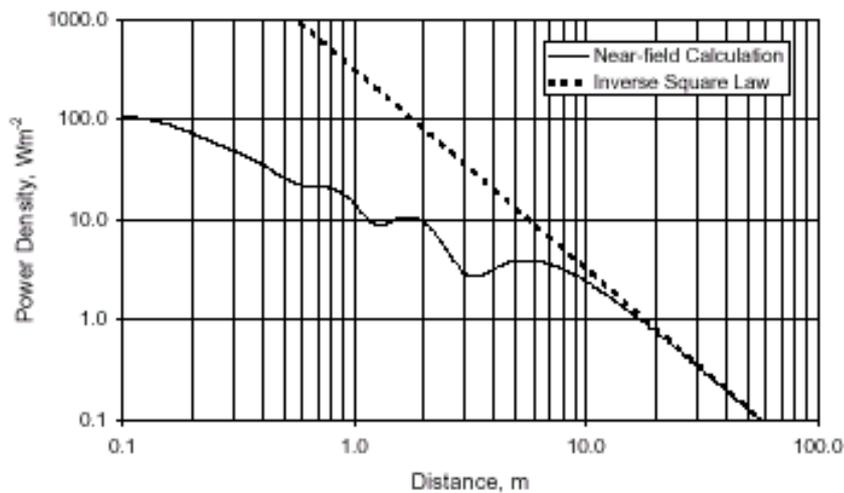
zone Fresnel
 $2D^2/\lambda$ (13,6 m)

zone homogène

	Zone de champ réactif	Zone de champ proche (Fresnel)	Zone de champ Lointain (homogène)
$E \perp H$	<i>Non</i>	\approx <i>Non</i>	<i>Oui</i>
$Z=E/H$	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$
Mesure des composantes	E et H	E et H	E ou H

Avec: D = dimension de l'antenne λ = longueur d'ondes

Ainsi la caractérisation d'une station de base est souvent réalisée en zone de Fresnel (fréquence de 900 MHz et antennes de communication de grande taille), le champ étant homogène à 10 m. Le graphique ci-dessus montre que l'estimation de la densité en $1/d^2$ à partir des valeurs mesurées à grande distance (le champ en zone homogène varie en $1/d$) est très majorante à proximité de l'antenne.



Détermination du champ proche pour une antenne de gain 17 dB à 900 MHz

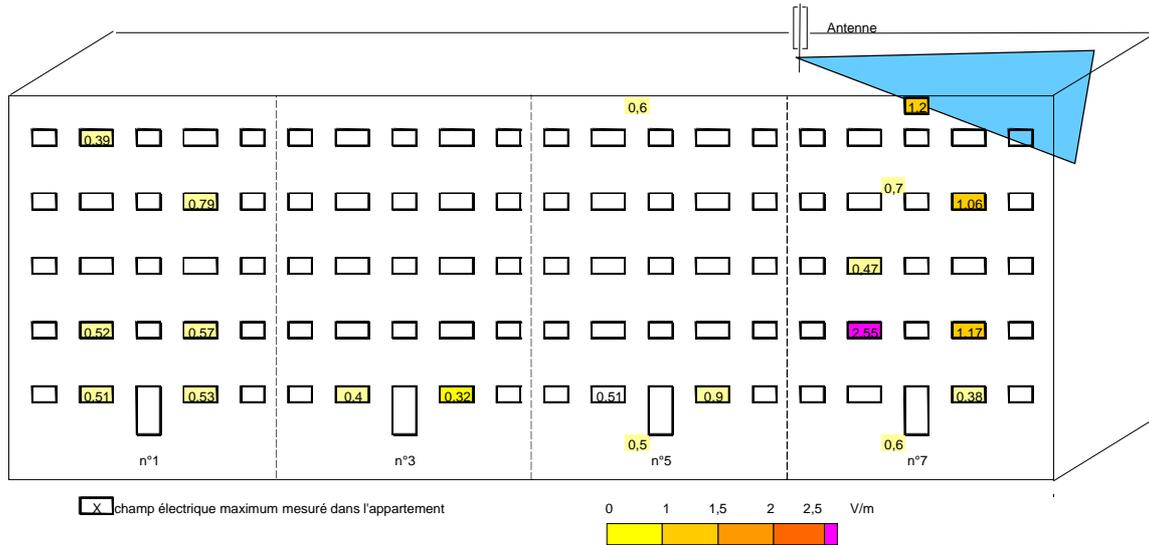
4.1.3 L'influence des réflexions multiples sur le sol et les objets environnants

Les réflexions se conjuguent à l'énergie incidente de la source et créent des fluctuations dues aux effets de propagation par trajets multiples qui peuvent renforcer ou réduire l'intensité du champ au point de mesure.

L'exemple ci-dessous montre une variabilité de 0,32 à 2,55 V/m (soit 18 dB) sur un bâtiment de 68 m de long, ces variations résultent de 3 facteurs :

- L'influence de la directivité des antennes,
- L'affaiblissement linéique des ondes,
- L'influence des réflexions multiples.
- L'influence d'émetteur parasites



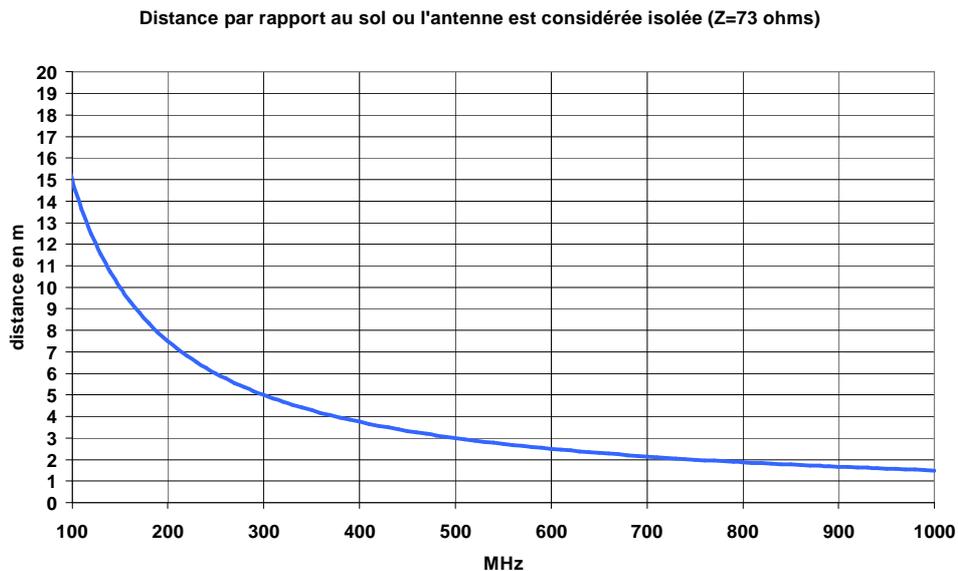


Cet exemple montre qu'il n'est pas possible de distinguer l'effet d'un facteur par rapport à l'autre, la mesure étant le résultat combiné de tous ces facteurs. La mesure de 2,55 V/m correspond à un émetteur parasite dans l'appartement (ampoule électrique basse énergie produisant un champ par son oscillateur interne).

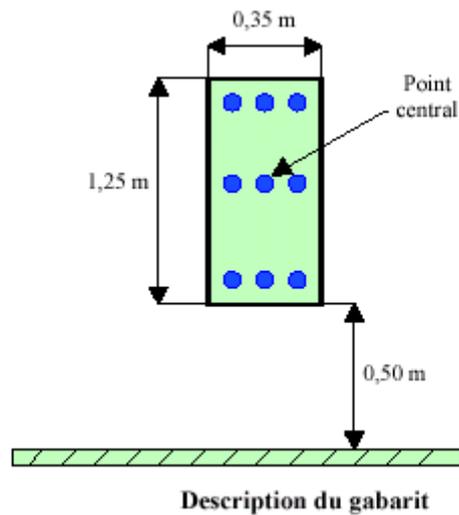
4.1.4 L'influence de la hauteur de l'antenne de mesure par rapport au sol

L'influence du sol est considérée négligeable lorsque l'antenne de mesure est située à une certaine hauteur qui est fonction de la fréquence du rayonnement.

Le graphe ci-dessous indique la distance minimale en fonction de la fréquence pour une antenne accordée en $\lambda/2$. A 900 MHz, la distance minimale est de 1,5 m, il est donc très fréquent de mesurer avec la sonde à une hauteur inférieure. Cette source d'erreur doit être connue afin de minimiser son influence en cherchant à disposer l'antenne le plus haut possible.



En effectuant une moyenne spatiale comme le préconise le protocole de l'ANFR, les influences des réflexions multiples et du sol sont partiellement prises en compte. L'ANFR préconise de faire une moyenne sur neuf points répartis sur une grille d'environ 0,35m x 1,25m à une distance de 0,5m au-dessus du sol.



Le champ résultant s'exprime sous la forme :

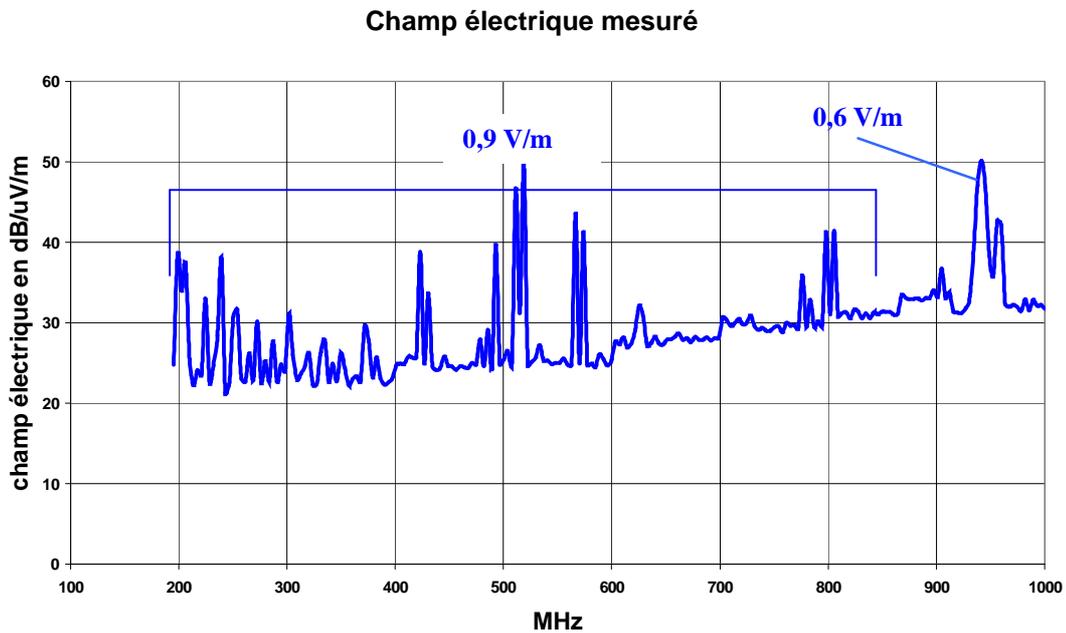
$$(E \text{ ou } H)_{\text{moyenne spatiale}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (E_i \text{ ou } H_i)^2}{9}}$$

Avec $(E_i \text{ ou } H_i)$, la grandeur électromagnétique mesurée en un point.

4.1.5 L'influence de la multiplicité des sources d'émission

Pour illustrer cette influence nous analysons l'enregistrement ci-dessous réalisé près d'une station de base de radiotéléphonie. Le spectre montre une émission de la station à 900 MHz et des émissions de radiodiffusion de télévision dans les bandes [500 à 600 MHz] et 800 MHz.

En appliquant les formules de sommation des champs tel que définies dans la recommandation européenne, le champ électrique dans la bande GSM est de 0,6 mV/m et la contribution de toutes les autres raies du spectre est de 0,9 mV/m.



Ainsi il est impératif de définir l'objectif pour la caractérisation du site, soit de connaître le risque dû à un émetteur spécifique ce qui implique de ne mesurer que la contribution de cet émetteur, soit d'évaluer l'exposition globale pour les personnes et de connaître le champ résultant.

Le champ résultant (mesuré avec une sonde large bande par exemple) est la somme quadratique des différentes composantes:

$$E_{total} = \sqrt{0,6^2 + 0,9^2} = 1,09 \text{ V / m}$$

4.1.6 L'influence de la modulation et du débit des communications

La station de base GSM (900 MHz) peut être considérée comme un ensemble d'émetteurs ou « TRX ». Elle est constituée :

- d'un émetteur voie balise « BCCH » de puissance constante P_{BCCH} ,
- de n-1 émetteurs d'une puissance égale à P_{BCCH} (n nombre total d'émetteurs sur la cellule).

De façon à prendre en compte le trafic maximal, il faut identifier à l'aide d'un analyseur de spectre la voie balise (BCCH) au moment de la mesure. La particularité de la voie balise est d'émettre un signal permanent et stable.

Caractéristiques "GSM"

Système	Voie Montante (MHz)	Voie Descendante (MHz)	Largeur canal (kHz)	Nombre de canaux
GSM (GSM900)	890-915	935-960	200	124
E-GSM (GSM900)	880-890	925-935	200	50
DCS (GSM1800)	1710-1785	1805-1880	200	374

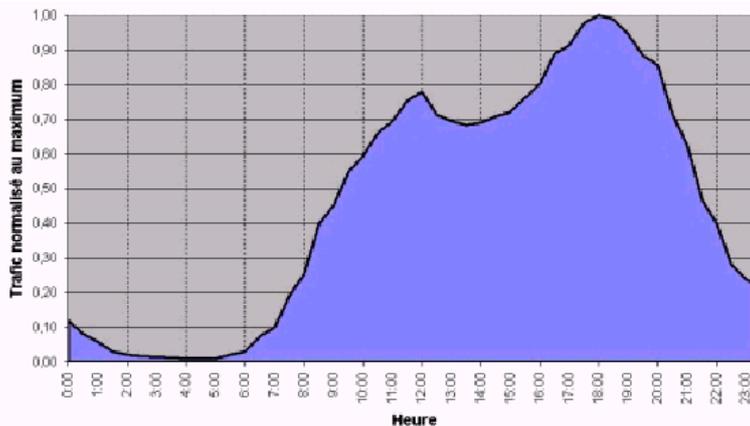
Numéros de canaux			
GSM :	canaux de 1 à 124	$F = 890 + (0,2 \times n)$	$F = 935 + (0,2 \times n)$
E-GSM :	canaux de 975 à 1024	$F = 890 + (0,2 \times (n - 1024))$	$F = 935 + (0,2 \times (n - 1024))$
DCS :	canaux de 512 à 885	$F = 1710,2 + (0,2 \times (n - 512))$	$F = 1805,2 + (0,2 \times (n - 512))$

Nombre de TRX fonction de la densité de population		
	900 MHz	1800 MHz
Zone haute densité	6	8
Grande ville (> 400 000 habitants)	4	8
Ville moyenne (> 100 000 habitants)	4	6
Petite ville ou zone rurale (< 100 000 habitants)	3	3

Puis d'identifier le nombre de canaux trafic (TRX). Le tableau ci dessous permet d'affecter, très simplement, un nombre de voies en fonction de la densité de population.

L'estimation du champ au maximum pour un trafic maximum est calculée par la formule suivante : $E_{estimé} = E_{BCCH} * \sqrt{n_{TRX}}$

Une mesure avec une sonde à diode (large bande) sera comprise entre E_{BCCH} et $E_{estimé}$. Cette valeur dépendra de l'instant de la mesure dans la journée. Le champ n'est pas en permanence au niveau de l'extrapolation, il varie au cours de la journée en fonction du trafic sur les émetteurs. Le gabarit type de trafic journalier permet de calculer le maximum de champ dans la journée.



4.2 FACTEURS D'INCERTITUDES ASSOCIES AUX MATERIELS DE MESURES

L'évaluation des matériels de mesure permet de déterminer les incertitudes ou les erreurs qui peuvent se produire dans les mesures sur site. Cette évaluation permet en outre d'élaborer des procédures qui peuvent réduire au minimum les erreurs de mesure.

Les facteurs d'incertitudes qu'il convient d'examiner sont les suivants :

- *Étalonnage absolu* - il doit être effectué à des niveaux de champ produisant des indications égales ou supérieures à la lecture de l'appareil au milieu de l'échelle.
- *Linéarité de l'appareil* - pour établir la linéarité de l'appareil, il faut effectuer des mesures à des niveaux de champ produisant des indications de 25, 50, 75 et 100 % de la pleine échelle, sur chaque plage du dispositif de lecture.
- *Réponse en fréquence* - la réponse en fréquence de l'appareil dans la bande visée doit être établie. La réponse doit être relativement uniforme sur la gamme de fréquences spécifiée (± 1 à 3 dB).
- *Réponse hors bande* - la sensibilité de l'appareil dans son ensemble doit être évaluée pour les champs à des fréquences hors de la gamme de fréquences spécifiée de l'appareil.
- *Polarisation* - il convient de noter toutes les variations de lecture quand on fait tourner la sonde sur l'axe de la poignée.
- *Champs captés par les conducteurs* - les variations de réponse quand on bouge les conducteurs de la sonde dans le plan de la composante électrique (E), toutes les mesures doivent être quantifiées dans les différentes positions.
- *Réponse en température* - les changements de réponse de l'appareil à un champ donné dans la gamme de températures visée doivent être déterminés.
- *Réponse en tension d'alimentation* - pour les appareils de contrôle RF alimentés par batterie, la précision globale doit être testée pour ce qui est des écarts par rapport à la tension nominale d'une ou de plusieurs des batteries.
- *Dérive et bruit* - la stabilité à court et à long terme de l'appareil doit être déterminée en ce qui a trait à la valeur maximale de l'échelle de chaque plage de mesures de l'appareil, en l'absence de champs électromagnétiques.

4.2.1 Sensibilité d'un capteur de champ à l'autre composante de l'onde électromagnétique.

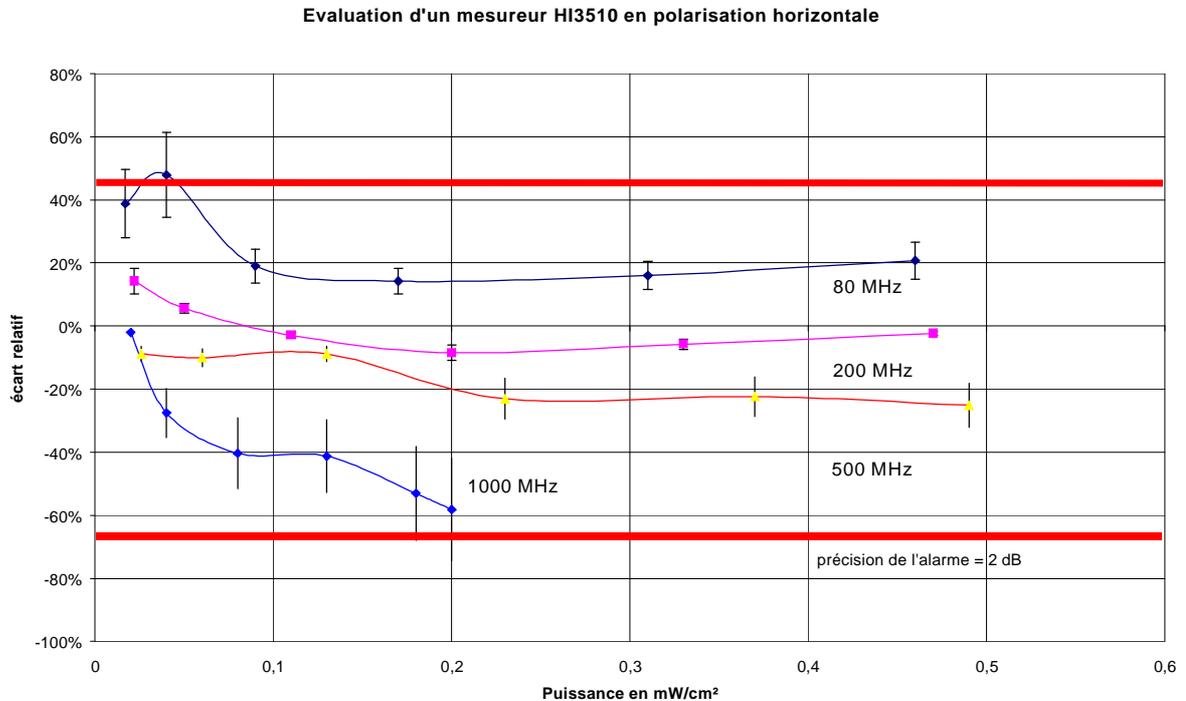
Le rayonnement d'une onde électromagnétique entraîne implicitement la présence simultanée du champ électrique et magnétique, dès que les champs sont variables dans le temps. Lorsque l'antenne d'émission est de type électrique, le champ électrique est prédominant à proximité de l'antenne, alors qu'avec une antenne magnétique le champ prédominant est magnétique. Lorsque l'on s'éloigne de l'antenne le rayonnement est dit « à onde plane », les champs s'équilibrent dans un rapport correspondant à l'impédance d'onde (377Ω). La difficulté est de mesurer le champ électrique à proximité d'une antenne magnétique ou inversement, la sonde pouvant être perturbée par la composante

prédominante. Cet aspect est peu influent dans la caractérisation de station de base de radiotéléphonie.

4.2.2 Linéarité de l'appareil et réponse en fréquence

La caractérisation d'un mesureur de champ portatif (modèle HOLADAY type HI3510) destiné aux opérateurs de radiocommunications sur site près d'antenne d'émission a été réalisée dans la cage de Faraday anéchoïque de l'INERIS.

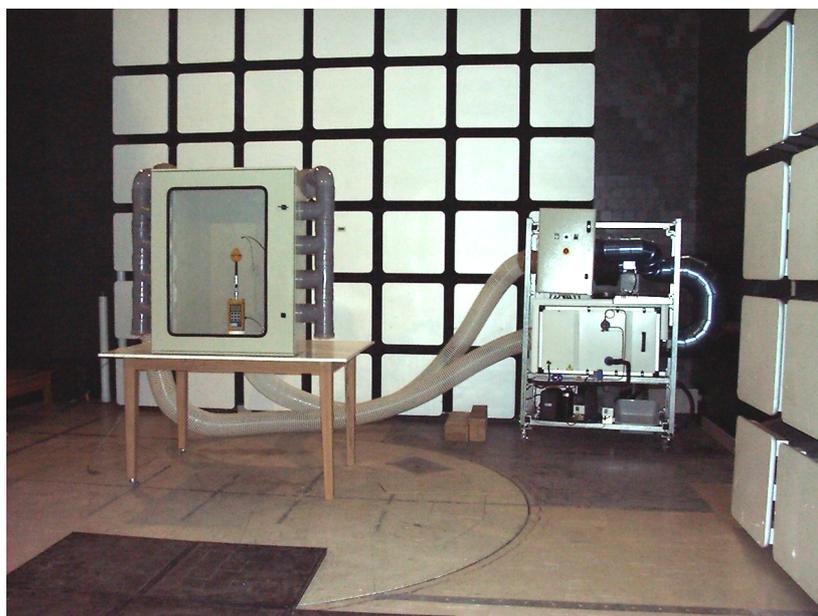
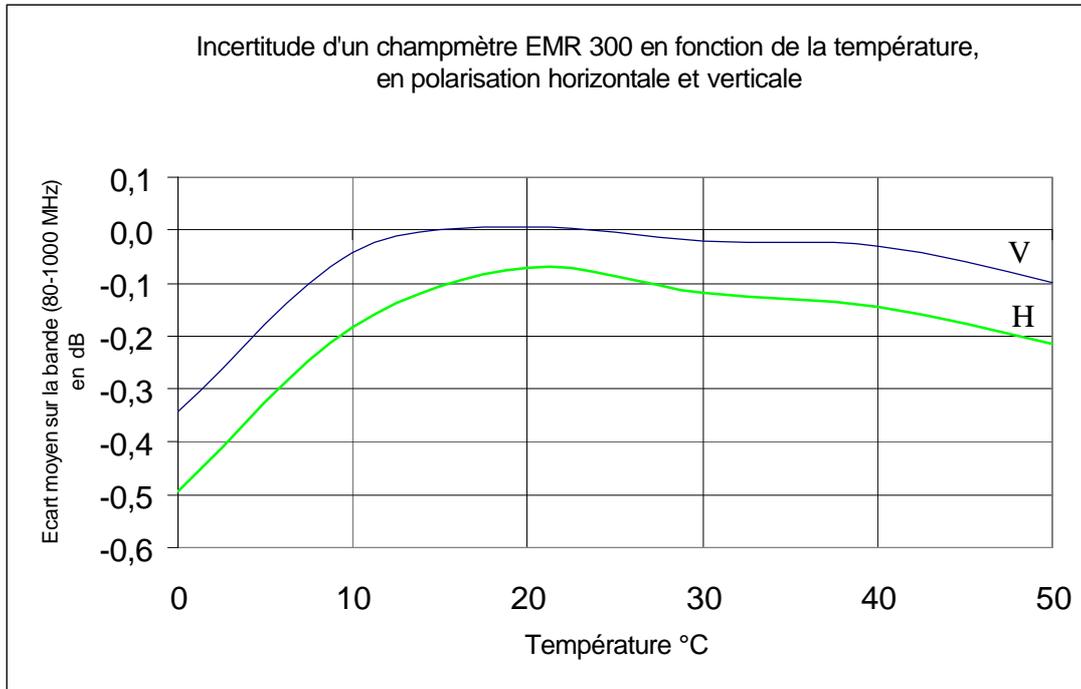
La courbe ci-dessous montre que l'appareil est conforme aux spécifications du constructeur dans la bande de fréquence de mesure [80-1000 MHz] pour des niveaux variants de 0,1 à 0,6 mW/cm², correspondant à une excursion en champ de 7 à 17 V/m. Ces tests montrent que la réponse du mesureur varie avec la fréquence et le niveau de champ. Il est donc nécessaire de qualifier ces matériels sur toute la bande de fréquence et pour différents niveaux de champ.



4.2.3 Influence de la température et de l'humidité

La température et l'humidité peuvent agir sur l'exactitude des mesures effectuées avec une sonde. Il faut s'assurer que celles ci seront effectuées dans la plage utile de la sonde ; des facteurs de correction peuvent être considérés pour compenser les mesures dans les conditions extrêmes d'humidité et de température.

Une enceinte climatique insensible aux ondes nous permet de mesurer les performances d'un champmètre en fonction de la température et de la fréquence reçue.



Équipement expérimental développé par l'INERIS pour la caractérisation en champ et température

La caractérisation du champmètre montre une bonne stabilité entre 10 et 50 °C et un écart de 0,5 dB entre 0 et 10 °C. Ces résultats confirment que la dérive en température est de l'ordre de 0,05dB/°C pour les détecteurs à diodes.

4.2.4 Etalonnage des matériels

Plusieurs méthodes d'étalonnage sont présentées par la suite. Il est important de préciser qu'il ne faut pas s'attendre à obtenir la même justesse quand on utilise ces appareils sur site, notamment pour les raisons suivantes :

- Ces appareils sont généralement étalonnés pour des champs homogènes (onde plane). Dans la pratique, ces champs n'existent pas toujours et le détecteur peut ne pas réagir de la même façon aux champs ayant des gradients spatiaux importants.
- Dans certain cas, seul le détecteur (sonde) est exposé au champ. Dans la pratique, c'est tout le système, y compris l'unité d'affichage et le câble de connexion, qui baigne dans le champ. Les réponses parasites provenant d'autres parties du système de mesure peuvent produire des erreurs importantes. L'incertitude globale présentée par ces facteurs est difficile à évaluer et varie en fonction du type de mesureur et de la situation d'utilisation. Cependant le respect des règles de l'art permet d'atteindre une précision de l'ordre de ± 1 à 3 dB; l'incertitude augmentant en champ proche.

Etalon primaire

Les méthodes d'étalonnage primaires reposent sur le principe selon lequel une intensité de champ peut être établie et connue par calcul (absence d'étalon de référence). L'appareil à étalonner est placé dans ce champ standard, la mesure est comparée à la valeur calculée du champ.

Il existe trois méthodes de base pour produire un champ d'étalonnage standard :

- la méthode du champ standard en espace libre,
- la méthode de l'onde guidée,
- la méthode de la cellule TEM.

Le choix de la méthode dépend de la nature de la sonde à qualifier, de la gamme de fréquences, de la précision recherchée.

Méthode du champ standard en espace libre

L'objectif consiste à créer un champ d'étalonnage fiable et connu selon la méthode de propagation en espace libre. Dans la plupart des montages expérimentaux, on utilise un émetteur à hyperfréquences pour produire le champ de référence. La densité de puissance en un point donné est liée à la puissance fournie à l'antenne émettrice, au gain effectif de l'antenne et à la distance sur l'axe entre ce point et l'antenne. Ce montage n'est utilisable qu'avec un appareil à étalonner suffisamment petit et éloigné de l'antenne émettrice afin que la quantité d'énergie re-réfléchi vers le système émetteur soit négligeable.

Les principales sources d'erreur de la méthode en espace libre sont le brouillage par trajets multiples, les réflexions provenant des composants qui font partie du montage expérimental et les incertitudes dans la détermination du gain d'antenne.

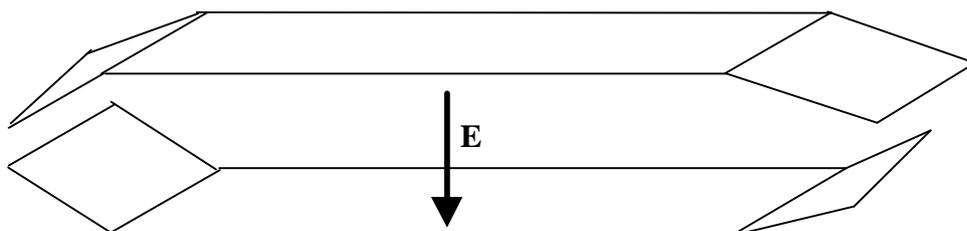
Guides d'ondes rectangulaires

Les guides d'ondes rectangulaires produisent des champs suffisamment uniformes pour que ces guides puissent être utilisés en source étalon. La sonde à étalonner est insérée dans le guide d'ondes par un trou de la paroi latérale et est placée au centre du guide, là où le champ est quasi uniforme. Le trou d'accès doit rester le plus petit possible afin d'en réduire l'effet sur la répartition du champ.

Les guides d'ondes rectangulaires sont beaucoup moins encombrants et nécessitent moins de puissance électromagnétique que la méthode du champ standard en espace libre. La dimension longitudinale du guide d'ondes doit être inférieure à la longueur d'onde à la fréquence d'étalonnage pour éviter les modes d'ordre élevé. Par conséquent, cette méthode n'est généralement utile que pour les fréquences inférieures à 2,6 GHz.

Étalonnage au moyen de cellules TEM

La cellule TEM (transverse électromagnétique) est composée d'une ligne de transmission à deux conducteurs plan fonctionnant en mode électromagnétique transverse, d'où son appellation. Au centre de la zone d'étalonnage, le champ électrique, polarisé verticalement, est uniforme. L'impédance d'onde (E/H) sera proche de la valeur en espace libre de 377Ω .



Les cellules TEM peuvent avoir différentes tailles pour s'adapter à des besoins particuliers et à des gammes de fréquences données. Toutefois, étant donné que la largeur doit être inférieure à une demi-longueur d'onde pour éviter les modes d'ordre élevé dans la cellule, la fréquence supérieure utile d'une cellule TEM est d'environ 500 MHz.

Générateurs de champs magnétiques

Aux fréquences moins élevées, le champ magnétique étalon est obtenu au centre d'une antenne cadre circulaire parcourue par un courant. Ce dispositif est adapté pour produire un champ magnétique aux fréquences inférieures à la résonance de l'antenne. Une antenne cadre est équivalente à une self-inductance et une capacité parasite, la fréquence de résonance est la fréquence où la self-inductance résonne avec la capacité parasite, les caractéristiques électromagnétiques sont alors instable et fluctuantes. Ces dispositifs sont utilisés pour étalonner les sondes, jusqu'à une fréquence d'environ 30 MHz.

4.2.5 Etalon Secondaire

Cette méthode est la plus simple, elle est probablement la meilleure pour étalonner les appareils de contrôle d'exposition aux rayonnements électromagnétiques pour des applications sur le terrain.

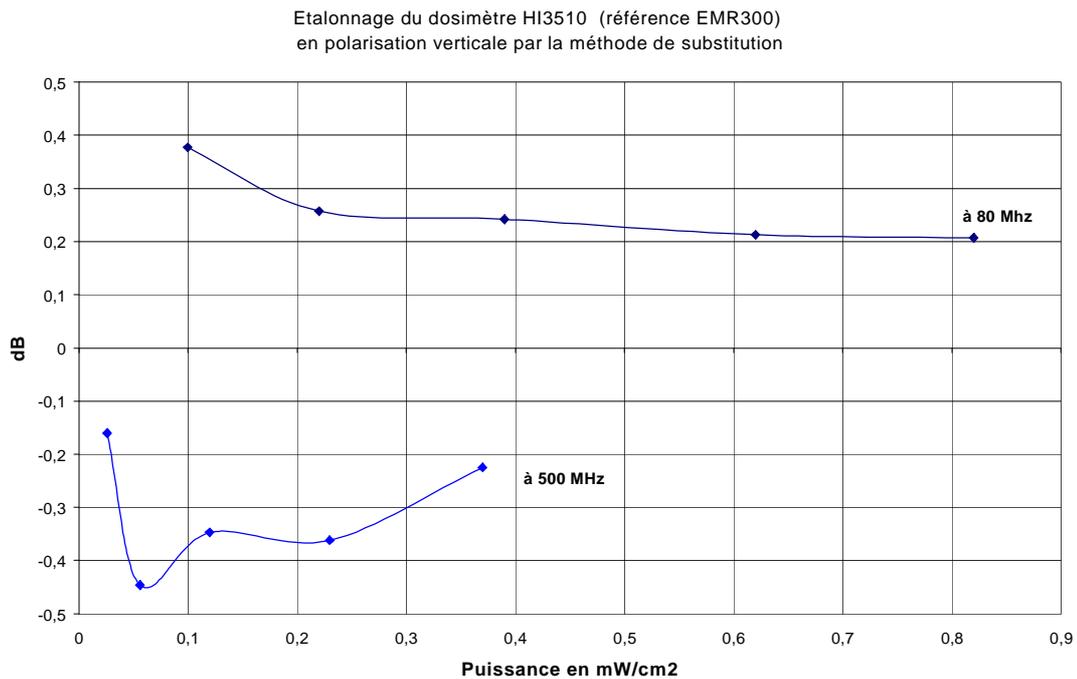
L'objectif consiste à disposer d'une sonde stable et fiable, étalonnée avec précision par une des méthodes exposées ci-dessus et de s'en servir comme « étalon de transfert ».

La sonde étalon sert à mesurer l'intensité de champ produite par un générateur de champ RF arbitraire, par exemple une antenne émettrice dans une cage de Faraday.

Puis par substitution, la sonde non étalonnée est mise au même endroit que la sonde étalon. La mesure permet de déterminer l'écart par rapport à l'étalon primaire. Le dispositif émetteur doit produire un champ constant dans le temps, le champ doit être uniforme dans la région où est placée la sonde non étalonnée. Il est facile d'obtenir, grâce à cette méthode, une précision de l'ordre de ± 2 à 3 dB.

La commodité, la fiabilité et la simplicité sont les avantages de cette méthode. Des diagrammes de réception différents entre les deux sondes constituent une source possible d'erreur. En outre, en champ proche, la taille du détecteur de la sonde est importante. Idéalement, les sondes étalon et non étalonnée doivent avoir des caractéristiques nominales identiques, et l'étalonnage doit se dérouler dans un champ relativement exempt de variations spatiales attribuables aux interactions de trajets multiples.

Dans les cellules TEM (systèmes d'émission à plaques parallèles), le couplage capacitif entre la sonde et la plaque centrale et les parois de la cellule peut entraîner des erreurs d'étalonnage. La sonde étalon de transfert doit être stable, robuste et résister au claquage; elle doit avoir une plage dynamique importante, couvrir une vaste gamme de fréquences et avoir une réponse isotrope.



Les courbes ci-dessus montrent l'écart (en dB) entre un étalon primaire étalonné sur site libre par le National Physical Laboratory et le mesureur de champ HOLADAY HI 3510 précédemment évalué en linéarité et réponse fréquentielle.

5. CALCUL DE L'INCERTITUDE DE MESURE

L'incertitude est un paramètre associé au résultat de mesure qui caractérise la dispersion, elle diffère de l'erreur par la non connaissance de la valeur vraie. L'erreur est la différence entre la valeur vraie (et connue) et la valeur mesurée.

La détermination de l'incertitude d'un résultat est obtenue en évaluant les incertitudes par des données statistiques (répétition des mesures et détermination de données statistiques) et les incertitudes dues à des facteurs identifiés mais mal quantifiés. L'incertitude totale est la somme de 2 catégories des facteurs d'incertitude :

- Celles qui sont évaluées par des méthodes statistiques (incertitude de type A), elles suivent une distribution Normale
- Celles qui sont évaluées par d'autres méthodes (incertitude de type B), elles suivent des lois de distributions fixées a priori par l'expérimentateur (rectangulaire, triangulaire, en U,...)

L'incertitude standard est notée u_i . Le tableau ci dessous définit l'incertitude standard en fonction de la loi de distribution.

Elle est obtenue par l'estimation de l'écart type pour les incertitudes associées à des observations statistiques pour un facteur de type A.

Elle est fonction de la grandeur $a = (a_+ - a_-)/2$ (avec a_+ limite supérieure et a_- limite inférieure de la quantité mesurée) et du choix de la loi de distribution pour des facteurs de type B.

Exemple : calcul de l'incertitude due à la désadaptation entre l'antenne et le câble de liaison :

En faisant l'hypothèse que la désadaptation entre l'antenne de réception et le câble de liaison est un facteur d'incertitude de type B (ce qui signifie qu'il n'y a pas eu de mesures répétées pour quantifier ce paramètre), le coefficient $a = (a_+ - a_-)/2$ est déterminé par le calcul du coefficient de réflexion en fonction des impédances des différents éléments (20 % soit 1,5 dB), en faisant l'hypothèse d'une distribution rectangulaire correspondant à une probabilité identique quelque soit le coefficient de désadaptation, l'incertitude standard est de $1,5 \text{ dB} / \sqrt{3}$, soit 0,86 dB.

Loi de distribution	u_i	Remarque
Rectangulaire	$a/\sqrt{3}$	
Triangulaire	$a/\sqrt{6}$	
Normale	$\sigma.k$	où k est un facteur de couverture (nombre de fois l'écart type, $k = 1$ correspondant à un niveau de confiance de 66%, $k = 2$ à 95%, $k = 3$ à 99%)
En U (asymétrique)	$a/\sqrt{2}$	

5.1.1 Composants contribuant à l'incertitude d'une mesure de champ électromagnétique

5.1.1.1 Contribution des matériels de mesure

◆ Facteur d'antenne

L'étalonnage de l'antenne sur une bande de fréquences donne un facteur d'antenne en fonction des fréquences de mesure. Cette procédure d'étalonnage conduit à une incertitude qui peut être donnée par le constructeur. En l'absence d'information précise, cette incertitude est estimée à 3 dB à 95 % ($k=2$).

Dans le cas de l'utilisation d'une sonde isotrope l'incertitude sur le facteur d'antenne comporte d'une part l'incertitude d'étalonnage et d'autre part l'incertitude liée à la réponse en fréquence.

◆ Isotropie

Ce type d'incertitude n'est évalué que lors de l'utilisation d'une sonde de mesure de champ isotropique. Dans le cas de l'utilisation d'une antenne étalonnée non isotropique, l'incertitude entre dans le cadre de l'orientation de l'antenne.

L'isotropie des sondes sur une bande de fréquences est souvent donnée par le constructeur. Il est possible d'effectuer une évaluation de l'isotropie en utilisant un champ connu et en tournant la sonde sur elle-même, l'isotropie suit une distribution rectangulaire.

◆ Linéarité de la sonde

Les sondes ayant des diodes de détections ont une réponse qui est linéaire sur certaines valeurs de champ et quadratique sur d'autres. Le champ est souvent évalué dans la partie quadratique de la sonde, conduisant à une proportionnalité entre la tension mesurée et le carré du champ. L'écart par rapport à la courbe de correspondance conduit à une erreur qui est de l'ordre de 1 dB à 95 % ($k=2$).

◆ Dispositif de mesure

La contribution à l'incertitude des dispositifs de mesure, par exemple un voltmètre, doit être évaluée par référence à ses certificats d'étalonnage. L'incertitude due au dispositif de mesure doit être évaluée en supposant une distribution normale de probabilité.

A cette incertitude, il faut ajouter les incertitudes dues aux câbles, typiquement de 0,2 dB à 95% ($k=2$).

5.1.1.2 Contribution des paramètres extérieurs

◆ Visée de la source

En cas d'utilisation d'une antenne étalonnée non isotrope, la procédure de mesure précise comment orienter l'antenne et trouver l'orientation des champs. Cette procédure est applicable en particulier lorsque la source est clairement identifiée et en visibilité directe. Cependant la mesure permet difficilement de tenir compte de la contribution du champ provenant de plusieurs directions.

L'incertitude de positionnement est estimée à 5° d'orientation. Cette incertitude suit une distribution rectangulaire.

◆ **Variations spatiales du champ dues aux réflexions multiples**

Lorsque la mesure ne s'effectue pas dans le faisceau principal de l'antenne, le champ provient souvent d'une somme de contributions provenant de diverses directions. Le champ résultant provenant de multiples directions suit une distribution de Rayleigh.

Un seul paramètre (S) permet de caractériser une distribution de Rayleigh.

L'incertitude à 95 % est atteinte pour un intervalle de +/- 2S. L'incertitude sur la moyenne de N mesures est de $2S/\sqrt{N}$. Typiquement S est de 5 à 7 dB en zone urbaine et peut atteindre 10 dB en zone confinée.

L'incertitude à 95 % sera de 20 dB au maximum pour une mesure et de 6,7 dB pour 9 points de mesures comme le préconise le protocole.

Pour les mesures dans le faisceau principal de l'antenne, l'incertitude due aux réflexions multiples n'est pas à prendre en compte.

◆ **Présence de plusieurs sources d'émission**

L'incertitude associée à ce facteur est très délicate à estimer, l'erreur induite par la présence d'autres sources non identifiées peut fausser complètement la mesure. Si l'on vérifie qu'il n'y a pas d'émetteur puissant à proximité, l'incertitude peut être estimée à 6 dB (cf. exemple au paragraphe 4.4, mesure à 900 MHz = 0,6 V/m pour un champ total de 1,08 V/m).

*** Evaluation de l'incertitude totale**

Incertitudes combinée et étendue

Il est important de rappeler les hypothèses de calcul de l'incertitude totale, en particulier les hypothèses sur les distributions de chaque facteur, l'incertitude de chaque facteur pour un intervalle de confiance donné.

L'incertitude combinée doit alors être évaluée selon la formule suivante :

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2}$$

où c_i est le coefficient de pondération égal à 1, si toutes les incertitudes sont exprimées par rapport à un champ.

◆ Exemple 1 : Calcul de l'incertitude étendue avec une sonde large bande

- pour un intervalle de confiance de 95 %,
- moyenne spatiale sur 9 points,
- avec une sonde isotropique.

SOURCES D'ERREUR	Valeur d'incertitude dB (I)	Distribution de probabilité	Facteur de division (k)	c_i	Incertitude Type*
Appareillage de mesure					
Facteur d'antenne		Normale	k	1	
Isotropie		Rectangulaire ou normale	$\sqrt{3}$ ou k	1	
Linéarité	2	Rectangulaire ou normale	$\sqrt{3}$ ou k	1	2
Incertitude d'étalonnage sur la calibration	2	Normale	k	1	2
Paramètres extérieurs					
Champ en zone de Fresnel et influence de la hauteur	6	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	3,5
Plusieurs sources d'émission	6	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	3,5
Réflexion et diffusion	6,7	Rayleigh	$\sqrt{3}$	1	3,86
Incertitude standard combinée		$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2} = 6,9$			
Incertitude étendue (Intervalle de confiance de 95%)		Log. normale	$u_e \approx u_c \approx 6,9 \text{ dB}$		

* : incertitude type = I / facteur de division pour les incertitude de type B
 incertitude type = I pour les incertitudes de type A

◆ **Exemple 2 : Calcul de l'incertitude étendue avec un analyseur de spectre**

- pour un intervalle de confiance de 95 %,
- moyenne spatiale sur 9 points,
- avec un analyseur de spectre.

SOURCES D'ERREUR	Valeur d'incertitude DB (I)	Distribution de probabilité	Facteur de division (k)	c _i	Incertitude Type*
Appareillage de mesure					
Facteur d'antenne	1,5	Normale	k	1	1
Isotropie	1,5	Rectangulaire ou normale	$\sqrt{3}$ ou k	1	1,5
Linéarité	0,7	Rectangulaire ou normale	$\sqrt{3}$ ou k	1	0,7
Incertitude d'étalonnage sur la calibration		Normale	k	1	
Paramètres extérieurs					
Champ en zone de Fresnel et influence de la hauteur	6	Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	3,5
Plusieurs sources d'émission		Rectangulaire	$\sqrt{3}$	1	
Réflexion et diffusion	6,7	Rayleigh	$\sqrt{3}$	1	3,86
Incertitude standart combinée		$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2} = 5,6$			
Incertitude étendue (Intervalle de confiance de 95%)		Log. normale	$u_e \approx u_c \approx 5,6 \text{ dB}$		

* : incertitude type = I / facteur de division pour les incertitude de type B
 incertitude type = I pour les incertitudes de type A

5.2 SYNTHÈSE DES SOURCES D'INCERTITUDES ET MOYENS DE LES RÉDUIRE

Facteurs associés au matériel de mesure	Facteurs environnementaux	Moyen de les réduire
	Réflexion des ondes sur le sol et les objets environnants (peut renforcer ou réduire l'intensité du champ au point de mesure)	Faire une mesure moyenne sur une zone donnée Rechercher le maximum dans une zone donnée S'éloigner d'obstacle immédiat
	Plusieurs sources d'émission (harmoniques, émetteur à proximité sur une autre fréquence)	Analyse en bande étroite avec un analyseur de spectre
	Influence de la hauteur de l'antenne par rapport au sol sur le facteur d'antenne	Moyenner sur plusieurs hauteurs
	Sonde très proche d'une antenne d'émission, un couplage peut se produire entre la sonde et l'antenne active	Mesurer le champ électrique et magnétique et calculer la densité de puissance. Mesurer avec une sonde isotropique la plus petite
Certaines modulations peuvent influencer sur la fiabilité des résultats de mesure		Connaître la nature de la modulation et effectuer les corrections nécessaires
Sensibilité à l'autre composante du champ électromagnétique		Mesurer le champ électrique près d'une antenne filaire et magnétique près d'une boucle de courant
Influence de la température et de l'humidité		S'assurer que l'instrument est adapté aux conditions d'essais
Incertitude du facteur d'antenne		
Incertitude de l'isotropie de la sonde		
Linéarité du récepteur		
Directivité de l'antenne		Rechercher le maximum en tournant l'antenne
Désadaptation entre l'antenne et le récepteur		
Incertitude sur la calibration du champ mètre		

6. CARACTÉRISATION DES STATIONS DE BASES DE RADIOTÉLÉPHONIE

La caractérisation d'une station de base s'appuie sur un protocole de mesure de l'ANFR qui tient compte des sources d'incertitude afin de fournir des valeurs de champ les plus pertinentes pour évaluer l'expositions associées aux rayonnements électromagnétiques.

L'Agence Nationale des Fréquences (ANFR) a établi un protocole de mesure et désigné des organismes compétents, dont l'INERIS, pour caractériser les sites. Les exigences importantes de ce protocole sont décrites dans ce chapitre à l'exception des aspects relatifs à la métrologie précédemment exposés.

Pour caractériser un site, il est nécessaire :

- **d'analyser l'environnement du site comprenant,**

- l'établissement d'une topologie des émetteurs présents,
 - Emplacement des émetteurs
 - Bandes de fréquences
 - Types d'émissions
 - Description du système antennaire (site d'installation, orientation des antennes, type d'antennes)
- **de déterminer des zones de mesure**
 - à partir de
 - l'expression de la demande
 - la topologie des émetteurs présents et de leurs zones de rayonnement
 - en distinguant
 - la zone à proximité d'une antenne d'émission (cas de la vérification d'un périmètre)
 - la zone ayant un niveau de champ ambiant supérieur au seuil de sensibilité d'une sonde isotropique large bande¹ (entre 0,1 et 1 V/m)
 - La zone ayant un niveau de champ ambiant inférieur au seuil de sensibilité d'une sonde isotropique large bande²

- **d'analyser des zones de mesure**

La mesure du champ électromagnétique de chaque émission se limite à la mesure d'une seule composante électrique ou magnétique en s'assurant préalablement que nous sommes dans les conditions d'une émission en champ formé. Le protocole indique que la mesure d'une composante est suffisante aux distances suivantes :

- ♦ 0,30 m pour un émetteur de téléphonie mobile à 900 MHz et 0,15 m pour un émetteur à 1800 MHz
- ♦ 3 m pour un émetteur de radiodiffusion sonore (bande FM)
- ♦ de 0,5 m à 6 m pour un émetteur de radiodiffusion de télévision (6 m en bande I - 1,5 m en bande II - 0,5 m en bande III et IV)

Ces distances sont optimistes, en effet la zone de champ homogène dépend de la taille des antennes d'émission, la zone de Fresnel pouvant aller jusqu'à 10 m en radiotéléphonie.

Processus de mesure

Les mesures sont relatives aux émissions présentes au moment des mesures. On veillera à respecter les consignes d'utilisation des équipements de mesure préconisées par le constructeur (temps nécessaire de préchauffe des équipements de mesure, par exemple).

Pour une position donnée, les opérations suivantes sont à effectuer :

¹ Le choix des points de mesure sera guidé par la détermination sur site des zones de champ maximal à l'aide d'une sonde de mesure de champ isotropique large bande. Les mesures sont effectuées avec un analyseur de spectre associé à une antenne étalonnée. La moyenne spatiale est effectuée sur 9 points.

² La détermination d'une zone de champ maximal est alors difficile à réaliser, on choisit un point de mesure selon la topologie des émetteurs présents et les règles de l'art. Les mesures sont effectuées avec un analyseur de spectre associé à une antenne étalonnée.

- ♦ **A** : Relevé de la position géographique du point de mesure (par exemple, GPS ou lecture d'une carte géographique). Les aspects spécifiques éventuels du point de mesure sont à noter sur le compte rendu de mesure.
- ♦ **B** : Sélection de l'antenne de mesure étalonnée (adaptée aux émissions) et du récepteur associé, selon les bandes d'analyse.
- ♦ **C** : Enregistrement de la date et de l'heure du début des mesures.
- ♦ **D** : Détection des émissions significatives. Les émissions considérées comme significatives seront celles qui ont un niveau de champ supérieur au millième du niveau de référence de la recommandation à la fréquence considérée (champ 60 dB inférieur au niveau de référence). Les émissions fugitives et non répétitives ne sont pas prises en compte.
- ♦ **E** Recherche de la polarisation

En parcourant la bande de fréquences sélectionnée de façon compatible avec la largeur minimale du canal rencontrée dans cette bande de fréquences et de l'antenne utilisée, on effectue:

- Des rotations de l'antenne principalement en direction des émetteurs recensés,
 - Un réglage du récepteur permettant de visualiser le maximum du signal au cours du déplacement de l'antenne.
 - ♦ **E** - Mesurer l'intensité de la ou des composantes du champ électromagnétique pour toutes les émissions significatives détectées au point précédent :
 - ♦ **E.1** - Régler la fréquence centrale sur chaque canal de l'émission ou un ensemble de canaux de même nature avec une résolution égale à la largeur du canal ou une résolution inférieure en effectuant un calcul cumulatif prenant en compte la forme du filtre de résolution (mode « Channel Power »)
- Pour le couplage maximal avec l'antenne, mettre le récepteur dans un mode permettant d'accéder à la valeur moyenne temporelle de la puissance sur une durée suffisamment longue de façon à obtenir un niveau stabilisé et le relever.
- ♦ **E.2** - Convertir ce niveau reçu en intensité de champ électrique.

Lorsque les mesures sont effectuées avec des antennes élémentaires comme la boucle magnétique ou le dipôle électrique, les mesures isotropes sont obtenues en orientant les antennes successivement suivant trois directions orthogonales et en sommant leurs contributions

Si l'on considère qu'il y a une contribution principale et que les contributions secondaires sont négligeables, il est alors possible d'utiliser une antenne directive (polarisation adaptée à celle de l'émission). L'antenne est orientée (direction, polarisation) de façon à obtenir le maximum d'intensité de champ E ou H :

- Rotation de 360° dans un plan horizontal pour la position de champ maximal
- Poursuite de la recherche dans le plan vertical pour la polarisation de l'émission
- Poursuite de la procédure jusqu'à la détection du point de champ maximum

Dans ce cas, l'incertitude de mesure liée à la non-isotropie est fortement liée au fait qu'il n'y a qu'une contribution principale et que les contributions secondaires sont négligées

- ♦ **F** : Enregistrement de l'heure de fin des mesures.

- ♦ **G** : Etablissement d'une moyenne spatiale. Les émissions à considérer pour la moyenne spatiale seront celles qui ont un niveau de champ supérieur au centième du niveau de référence de la recommandation à la fréquence considérée (champ 40 dB inférieur au niveau de référence). Les autres émissions significatives seront mesurées sur un seul point (point central)

6.1 EXEMPLE, CAS D'UN EMETTEUR GSM SUR UN BATIMENT

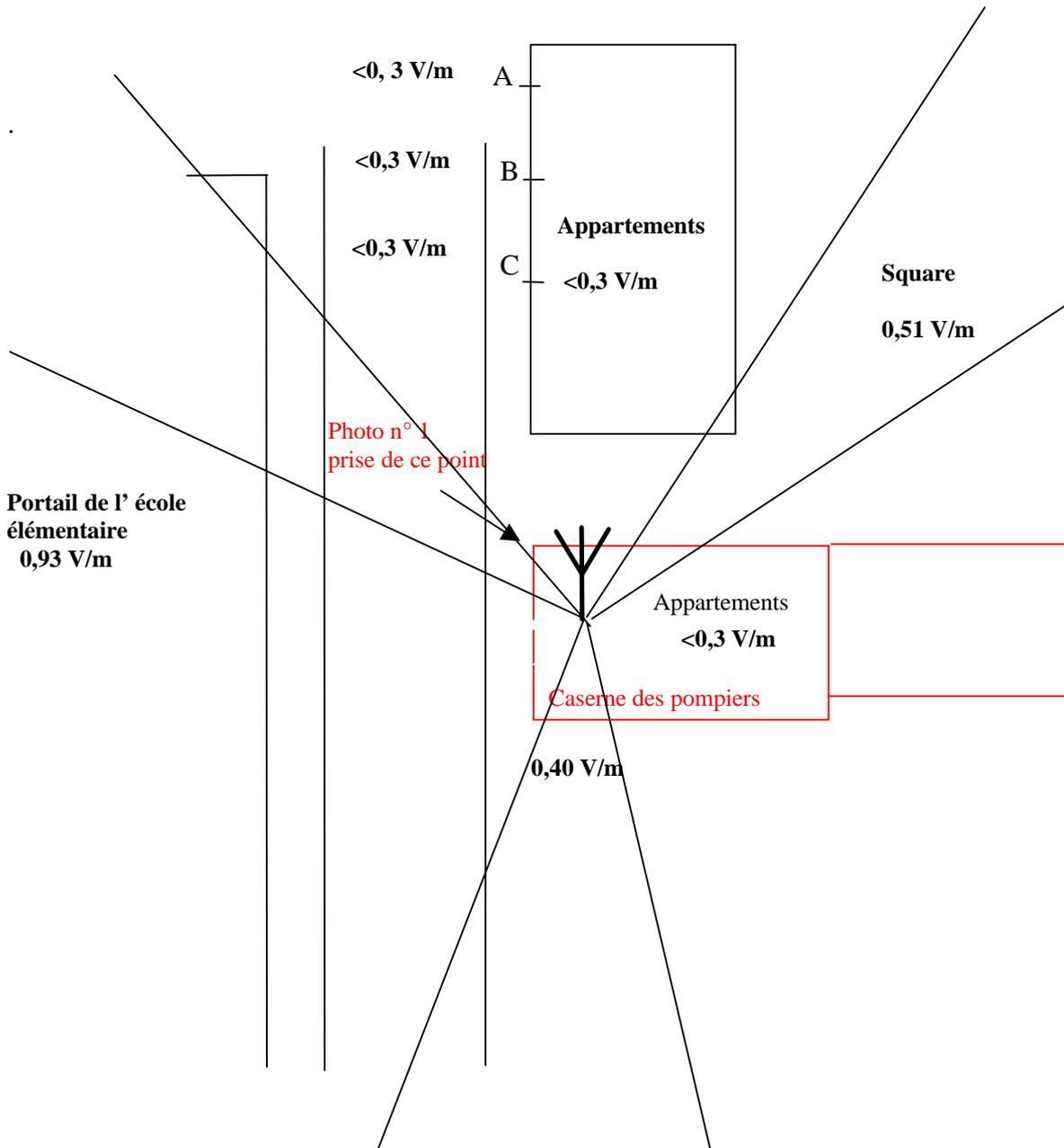
La station de base de radiotéléphonie est installée en toiture du bâtiment de la caserne des pompiers.

Il y a en toiture des antennes SFR dans la bande 935 à 960 MHz et une antenne pour les pompiers à une fréquence de 86 MHz, non utilisée pendant les mesures.



Antennes de la station de base téléphonique

Mesure avec une sonde de champ (large bande)



Mesures effectuées avec le mesureur de champ PMM 8053 en valeur maximale instantanée

Les mesures de champ réalisées sur ce site avaient pour but d'évaluer l'exposition produite par une base de radiocommunications située en toiture de la caserne des pompiers.

Les niveaux d'exposition de référence pour l'exposition du public aux champs électriques de la recommandation 99/519/CE sont :

Fréquence MHz	Limite pour E V/m	Limite pour H A/m	Limite en densité de Puissance W/m ²
900	41	0,11	4,5
1800	58	0,15	9

- Les mesures ont été réalisées entre 9h30 et 10h 30.
- Le coefficient de pondération par rapport au trafic maximum du canal BCCH est de 1,67 (en valeur moyenne).

Application à une mesure au niveau de la caserne :

Le champ mesuré en ce point est de 0,4 V/m.

- L'incertitude de mesure de cette chaîne (cf. § 5) est de 6,9 dB

Le champ mesuré varie donc entre 0,18 et 0,88 V/m (l'incertitude à 95 % de 6.9 dB).
Le champ maximum dans la journée peut être estimé à 0,88 . 1,67 = 1,47 V/m.
Soit un coefficient de sécurité de 28 (42/1,47).

Comparaison avec un analyseur de spectre

La comparaison est réalisée en un point situé à proximité de l'antenne mais pas au maximum de champ mesuré.

Nature de la mesure	Mesure sans correction	Valeur max. calculé (prise en compte de l' incertitude)	Valeur max. dans la journée	Coef. de sécurité
Sonde large bande	0,4	0,88 (I = 6,9 dB)	1,47	28
Analyseur de spectre	0,5	0,95 (I = 5,6 dB)	1,64 (n _{RTRX} = $\sqrt{3}$ (petite ville))	25

Cet exemple montre qu'en tenant compte de l'ensemble des facteurs influents sur la mesure, les résultats sont cohérents, et permettent de mieux estimer le coefficient de sécurité dans l'évaluation de l'exposition produit par le rayonnement de l'émetteur.

Les champs mesurés sont très en dessous des niveaux d'exposition de référence, définis pour le public dans la recommandation 99/519/CE.

Les résultats de la caractérisation de 15 stations de base sur l'année 2001 et 2002 montrent que le champ à proximité des antennes est très nettement inférieur à la recommandation européenne 99/519/CE. La limite réglementaire est de 41 V/m à 900 MHz (fréquences GSM), nous avons mesuré un maximum à 3 V/m et généralement des valeurs inférieures à 1 V/m.

7. NORMALISATION ET REGLEMENTATION

Nous avons cherché à recenser les normes et documents réglementaires en vigueur ou en projet concernant les rayonnements électromagnétiques sur la santé. L'examen a consisté à identifier les textes définissant des seuils (recommandations, normes, arrêtés,...) et les normes définissant les méthodes pour mesurer ces seuils.

Recommandations de l'ICNIRP (international commission on non-ionizing radiation protection)

- ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)- Health Physics 1998 (Vol. 74)
- ICNIRP Guidelines of limits of exposure to static magnetic field Health Physics 1994

Réglementation Européenne

- Recommandation européenne du 12 juillet 1999 relative à la limitation d'exposition du public aux champs électromagnétiques de 0 Hz à 300 GHz (1999/519/CE)

Réglementation française

- Arrêté du 14 novembre 2001 modifiant diverses autorisations d'établissement et d'exploitation de réseaux de télécommunications ouverts au public
- « *Par ailleurs, les équipements et installations de l'opérateur respectent les restrictions de base et les niveaux de référence définis dans la recommandation 1999/519/CE du Conseil du 12 juillet 1999 relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (de 0 Hz à 300 GHz).* »
- Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 relatif aux valeurs limites du public aux champs électromagnétiques utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques

Réglementation suisse

- Ordonnance sur la protection contre les rayonnements ionisants (814-710) du 23 décembre 1999

Réglementation américaine

- Guidelines for evaluating the environment effects of radio frequency radiation (FCC 96-326)
- IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields 3 KHz – 300 GHz

Normalisation fixant des seuils

Références	Intitulé
ENV50166-1	Exposition humaine aux champs électromagnétiques basses fréquences (0 Hz à 10 kHz)
ENV50166-2	Exposition humaine aux champs électromagnétiques hautes fréquences (10 kHz à 300 GHz)
C18-600	Exposition humaine aux champs électromagnétiques basses fréquences (0 Hz à 10 kHz)
C18-610	Exposition humaine aux champs électromagnétiques hautes fréquences (10 kHz à 300 GHz)
PrEN 50384	Norme produit pour démontrer la conformité des stations de base radio et stations terminales fixes pour les communications sans fil, par rapport aux restrictions de base ou aux niveaux de référence relatifs à l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques (110 MHz – 40 GHz)
PrEN 50385	Norme produit pour démontrer la conformité des stations de base radio et des stations terminales fixes pour les communications sans fil, par rapport aux restrictions de base ou aux niveaux de référence relatifs à l'exposition du public aux champs électromagnétiques (110 MHz – 40 GHz)
PrEN 50360	Norme produit pour la mesure de la conformité des téléphones mobiles aux restrictions de bases à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques (300 MHz – 3 GHz)
EN 50371	Norme générique pour démontrer la conformité des équipements électriques et électroniques de faible puissance avec les restrictions de base liées à l'exposition de l'homme aux champs électromagnétiques (10 MHz – 300 GHz) – grand public
EN 50364	Limitation de l'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques générés par des dispositifs fonctionnant dans le domaine de fréquences comprises entre 0 Hz et 10 GHz et utilisés pour la surveillance électronique des articles, dans l'identification par radiofréquence et dans les applications similaires
UTE 99-111	Recommandation concernant l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques en milieu professionnel

Normalisation de métrologie (méthodes de mesure des seuils)

Références	Intitulé
EN 50383 C99-103	Norme de base pour le calcul et la mesure des champs électromagnétiques du DAS à l'exposition des personnes provenant des stations de base radio et des stations terminales fixes pour les systèmes de télécommunications sans fil (110 MHz – 40 GHz)
EN 50357 C99-102	Evaluation de l'exposition du corps humains aux champs électromagnétiques générés par les dispositifs de surveillance électroniques des articles dans l'identification par radiofréquence et dans les applications similaires
EN 50361 C99-101	Norme de base correspondant à la mesure du débit d'absorption spécifique relatif à l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles (300 MHz – 3 GHz)
CEI 61786	Mesure de champs magnétiques et électriques à basse fréquence dans leur rapport à l'exposition humaine Prescriptions spéciales applicables aux instruments et recommandations pour les procédures de mesure
IEC 85/214/CD	Measuring equipment for electrical and electromagnetic quantities

