

Mesures de champ électromagnétique

par **Lucien BOITHIAS**

*Ancien Élève de l'École Polytechnique
Ingénieur Général des Télécommunications au Centre National d'Études
des Télécommunications (CNET)*

et **Alain AZOULAY**

*Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité (ESE)
Chargé du Département Compatibilité électromagnétique au Centre National d'Études
des Télécommunications (CNET) – Centre Paris-B*

1. But des mesures de champ	E 6 140 - 2
1.1 Détermination du niveau de signal utile.....	— 2
1.2 Détermination du niveau des signaux parasites.....	— 2
1.3 Études de propagation	— 3
2. Caractérisation d'une onde électromagnétique.....	— 3
2.1 Relations générales	— 3
2.2 Valeurs statistiques.....	— 3
2.2.1 Statistique dans le temps.....	— 3
2.2.2 Statistique dans l'espace	— 3
3. Caractérisation de l'amplitude d'un signal radioélectrique	— 5
3.1 Valeur moyenne.....	— 5
3.2 Valeur de crête	— 5
3.3 Valeur de quasi-crête.....	— 5
3.4 Valeur efficace.....	— 6
3.5 Valeur logarithmique moyenne.....	— 6
3.6 Influence de la largeur de bande du récepteur	— 6
3.6.1 Signaux à bande étroite.....	— 6
3.6.2 Signaux à bande large	— 6
4. Appareils de mesure de champ.....	— 7
4.1 Caractéristiques principales.....	— 7
4.1.1 Gamme de fréquences	— 7
4.1.2 Sensibilité et facteur de bruit.....	— 7
4.1.3 Dynamique de mesure	— 7
4.1.4 Sélectivité. Stabilité	— 8
4.1.5 Modes de détection	— 8
4.1.6 Étalonnage. Précision de mesure.....	— 8
4.1.7 Équipements auxiliaires. Périphériques	— 8
4.1.8 Alimentation. Encombrement. Masse	— 8
4.2 Types d'appareils de mesure.....	— 8
4.2.1 Récepteurs de mesure.....	— 8
4.2.2 Analyseurs de spectre	— 9
4.2.3 Comparaison des possibilités de chacun des appareils.....	— 9
4.2.4 Mesureurs de champ apériodiques	— 9
5. Antennes utilisées pour les mesures de champ.....	— 9
5.1 Rappels de notions sur les antennes	— 9
5.2 Choix du type d'antenne	— 10
6. Méthodes et procédures de mesure de champ	— 12
6.1 Mesure du rayonnement d'émetteurs radioélectriques.....	— 12
6.2 Mesure d'environnement radioélectrique.....	— 13
6.3 Mesure du rayonnement parasite d'équipements non destinés à rayonner de l'énergie radioélectrique	— 14
6.3.1 Réglementation des rayonnements parasites.....	— 14
6.3.2 Caractéristiques particulières des mesures de rayonnement parasites	— 14
6.4 Application pratique	— 15
Pour en savoir plus.....	Doc. E 6 140

L'expression **mesure de champ** est assez ancienne dans la technique des transmissions radioélectriques. À l'époque où la transmission se faisait surtout sur ondes relativement longues en polarisation verticale, on se préoccupait déjà de connaître les composantes du champ électromagnétique créé à une certaine distance par un émetteur. L'amplitude du champ électrique, exprimée par exemple en microvolts par mètre, était un élément tout à fait convenable pour caractériser cette onde. Compte tenu des grandes longueurs d'onde utilisées, la tension recueillie à l'extrémité d'un fil vertical était en effet à peu près proportionnelle à la longueur de ce fil, et l'expression **microvolts par mètre** était parfaitement imagée.

Lorsque l'on utilise des ondes plus courtes, cette tension n'est plus proportionnelle à la longueur du fil, mais cela n'empêche évidemment pas d'utiliser la notion de **champ électrique**. Il faut d'ailleurs remarquer que cette notion est parfaitement bien adaptée à des services comme la radiodiffusion, dans lesquels des émetteurs, en petit nombre et situés en des points bien déterminés, doivent créer, dans une certaine zone autour d'eux, un champ radioélectrique suffisant pour que de multiples récepteurs placés en des points quelconques de cette zone reçoivent un signal de qualité convenable.

Au contraire, pour des services de liaisons point à point comme les faisceaux hertziens, cette notion de champ radioélectrique perd de son intérêt au profit d'une notion plus énergétique que l'on appelle **affaiblissement de propagation de la liaison**. Le champ représente alors un intermédiaire inutile et il n'est donc pas utilisé.

Cependant, le besoin de caractériser le niveau reçu existe toujours. On utilise alors d'autres notions liées à l'amplitude de l'onde, comme par exemple la **puissance surfacique** (densité surfacique de puissance), qui peut s'exprimer en watts par mètre carré, ou encore la **puissance reçue** sur une antenne isotrope.

Nous précisons au paragraphe 2 les relations entre ces notions et nous conserverons toujours l'appellation de **mesure de champ**, même si la quantité mesurée n'est pas exactement le champ, mais une autre grandeur caractérisant l'onde électromagnétique.

1. But des mesures de champ

On peut être amené à mesurer le champ (ou une autre grandeur) d'une onde radioélectrique dans de nombreuses occasions qui peuvent être classées de la façon suivante.

1.1 Détermination du niveau de signal utile

Ce cas se présente en particulier lors de l'étude préliminaire avant l'installation d'une liaison, soit pour un service de type **point à zone** (radiodiffusion, service mobile), soit pour une liaison **point à point**.

La mesure se fait en général à fréquence fixe et on enregistre le champ soit en de nombreux emplacements dans le cas du service point à zone, soit en un petit nombre d'emplacements mais pendant une durée assez longue dans le cas d'une liaison point à point.

1.2 Détermination du niveau des signaux parasites

Ce cas se présente en particulier pour le choix d'un site avant l'implantation d'une station de réception (par exemple une station terrienne de télécommunication par satellite, une station de radioastronomie, etc.), ou même avant l'implantation d'installations dont le fonctionnement pourrait être troublé par des champs électromagnétiques intenses. La mesure se fait alors en général en un seul point ou au voisinage d'un point, mais dans une gamme de fréquences très étendues. En outre, on peut être conduit à analyser le signal reçu pour détecter en particulier l'existence d'impulsions brèves de grande amplitude qui pourraient avoir des effets néfastes.

On peut rattacher à ce type de mesure la détermination des niveaux des signaux radioélectriques parasites émis par un appareil non destiné à la transmission d'information, en particulier pour vérifier l'efficacité d'un blindage ou d'un dispositif *antiparasite*. La mesure se fait alors à proximité de l'appareil.

Les recommandations relatives à ce sujet ainsi que les méthodes de mesures correspondantes sont établies par le Comité International Spécial pour les Perturbations Radioélectriques (CISPR), organisme dépendant du Secrétariat de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI).

1.3 Études de propagation

On désigne généralement sous le nom d'étude de propagation l'étude de tous les phénomènes associés au milieu de propagation (troposphère, ionosphère, sol) entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception. Pour effectuer une telle étude, il faut, non seulement mesurer les caractéristiques de l'onde reçue, mais aussi connaître celle de l'onde émise (puissance, gain d'antenne, polarisation, etc.), afin de pouvoir en déduire l'influence du trajet de propagation. Dans ce cas, les mesures se font généralement à fréquence fixe et l'on effectue des enregistrements prolongés (plusieurs mois ou même plusieurs années) du niveau reçu. Les caractéristiques du signal émis sont maintenues aussi constantes que possible pendant toute la durée des enregistrements.

2. Caractérisation d'une onde électromagnétique

2.1 Relations générales

En supposant des vibrations fonctions sinusoïdales du temps, le champ électromagnétique en un point est caractérisé par :

- son amplitude ;
- sa polarisation ;
- sa phase (par rapport à une phase de référence).

Dans le cas des mesures de champ, on ne s'intéresse pas, en général, à la phase. En ce qui concerne la polarisation, on effectue la mesure suivant la polarisation de l'onde si elle est définie et connue, ou sinon, on peut faire la mesure dans deux polarisations orthogonales.

En ce qui concerne l'amplitude, on a le choix entre plusieurs solutions.

■ Si l'onde peut être considérée comme plane au voisinage du point de mesure, on a les relations suivantes, écrites en unités homogènes :

$$E = Z_0 H$$

$$P_s = E^2 / Z_0$$

$$P = \frac{\lambda^2}{4\pi} P_s$$

avec	E (V/m)	champ électrique de l'onde,
	H (A/m)	champ magnétique de l'onde,
	P (W/m ²)	puissance surfacique transportée par l'onde (c'est-à-dire la norme du vecteur de Poynting),
	W (W)	puissance reçue sur une antenne isotrope placée dans ce champ,
	Z_0 (Ω)	impédance intrinsèque du milieu (égale à 120 π, c'est-à-dire environ 377 Ω, dans le cas du vide ou approximativement de l'atmosphère),
	λ (m)	longueur d'onde ($\lambda = 300/f$ dans le vide et pratiquement dans l'air, avec f fréquence en MHz).

Le nomogramme de la figure 1 permet de passer d'une de ces grandeurs aux autres.

En général, les grandeurs sont exprimées en décibels (dB), ce qui se traduit par les relations suivantes :

$$E \text{ [dB(V/m)]} = H \text{ [dB(A/m)]} + 51,53$$

$$P_s \text{ [dB(W/m}^2\text{)]} = E \text{ [dB(V/m)]} - 25,76$$

■ Si l'onde ne peut être considérée comme plane, les relations précédentes ne sont pas valables. Cela se produit par exemple lorsque l'on effectue une mesure au voisinage d'une source radioélectrique, en particulier pour l'étude des problèmes d'antiparasitage. On a alors des résultats très différents suivant que l'antenne de mesure est sensible au champ électrique ou au champ magnétique.

En particulier, si l'onde peut être considérée comme rayonnée par un doublet électrique, le rapport du champ électrique au champ magnétique, à une distance r , petite par rapport à la longueur d'onde λ , est égal à :

$$\frac{E}{H} = \frac{Z_0 \lambda}{2\pi r} \gg Z_0$$

Une antenne de réception sensible au champ électrique (doublet) donnera alors une indication plus élevée qu'une antenne sensible au champ magnétique (cadre). Ce serait l'inverse si l'onde était rayonnée par une antenne assimilable à un doublet magnétique, c'est-à-dire pour une boucle ou une bobine. Ce dernier cas se rencontre très fréquemment. On a alors :

$$\frac{E}{H} = 2\pi Z_0 \frac{r}{\lambda} \ll Z_0$$

2.2 Valeurs statistiques

Dans de nombreux cas, on ne peut pas caractériser le résultat par une valeur unique du champ (ou d'une seule grandeur). Cela se produit en particulier lorsque le champ varie de façon aléatoire, soit dans le temps, soit d'un point à un autre. On doit alors introduire une notion statistique.

2.2.1 Statistique dans le temps

À l'extrémité d'une liaison entre deux points déterminés, le niveau reçu peut varier dans de grandes proportions en raison des variations des conditions de propagation (troposphérique ou ionosphérique). Certains types de propagation donnent même un champ fluctuant en permanence. On est alors conduit à étudier la loi de distribution du niveau reçu pendant une période donnée, par exemple un mois ou un an. Cette étude statistique est nécessaire, soit d'un point de vue pratique pour prévoir la qualité d'une liaison, soit d'un point de vue plus général pour étudier certains phénomènes de propagation.

2.2.2 Statistique dans l'espace

Si l'on cherche à déterminer la zone de service d'un émetteur de radiodiffusion ou d'une station de base du service mobile, on est amené à faire de multiples mesures de champ en des points répartis de façon aléatoire, car l'emplacement des récepteurs n'est pas connu. En certains de ces points, on trouve des champs élevés alors qu'en d'autres, pas très éloignés des précédents, le champ est beaucoup plus faible en raison d'un mouvement de terrain ou de quelque autre obstacle. Pour cette raison, on caractérise, en général, une zone de service par la valeur du champ qui y est dépassée en un pourcentage donné d'emplacements, par exemple 50 %. Par exemple, la figure 2 extraite du Rapport 567 du Comité Consultatif International des Radiocommunications (CCIR) donne des courbes de propagation correspondant à 50 % du temps et 50 % des emplacements, pour les services mobiles fonctionnant au voisinage de 900 MHz.

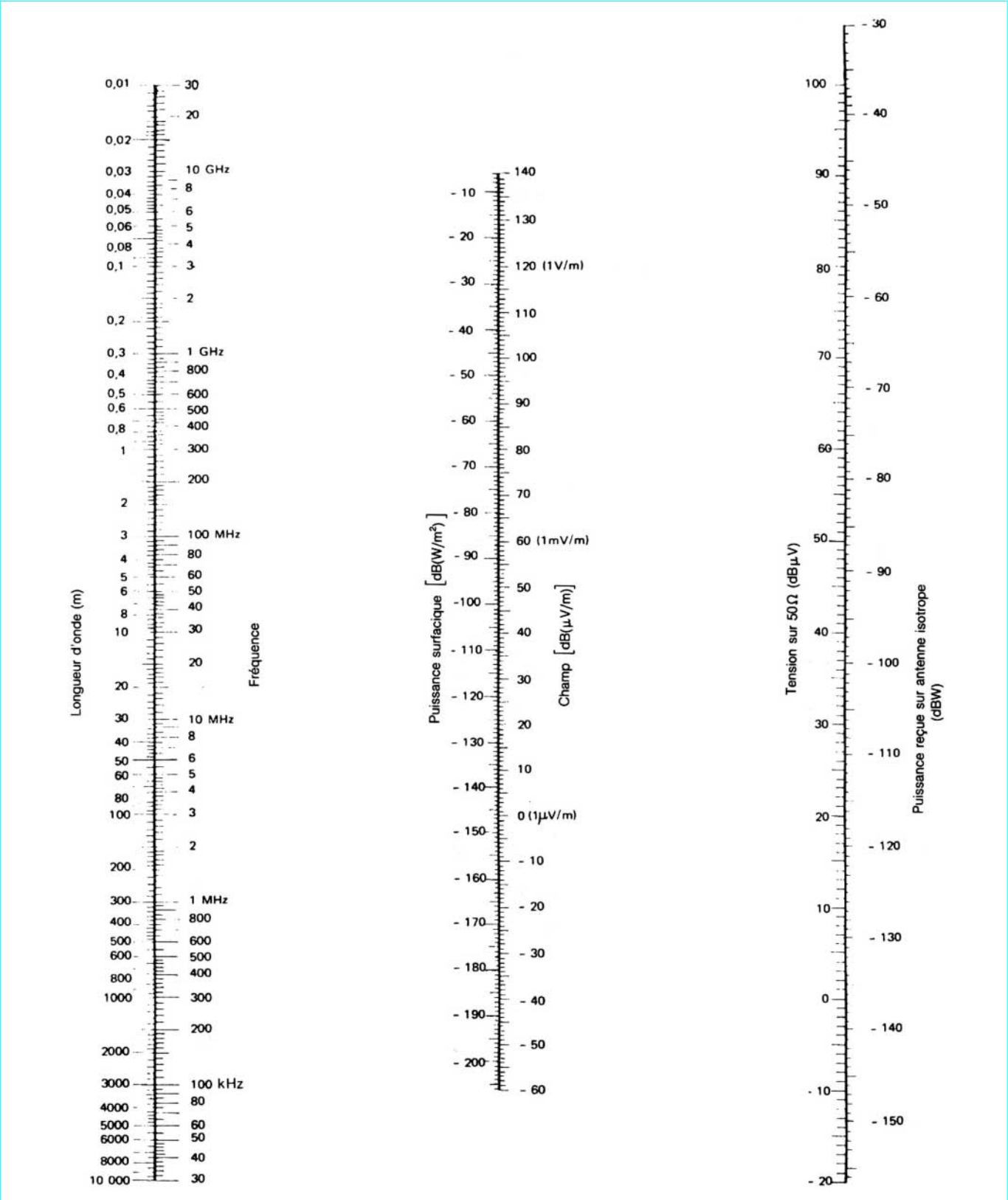


Figure 1 – Paramètres associés à une onde plane

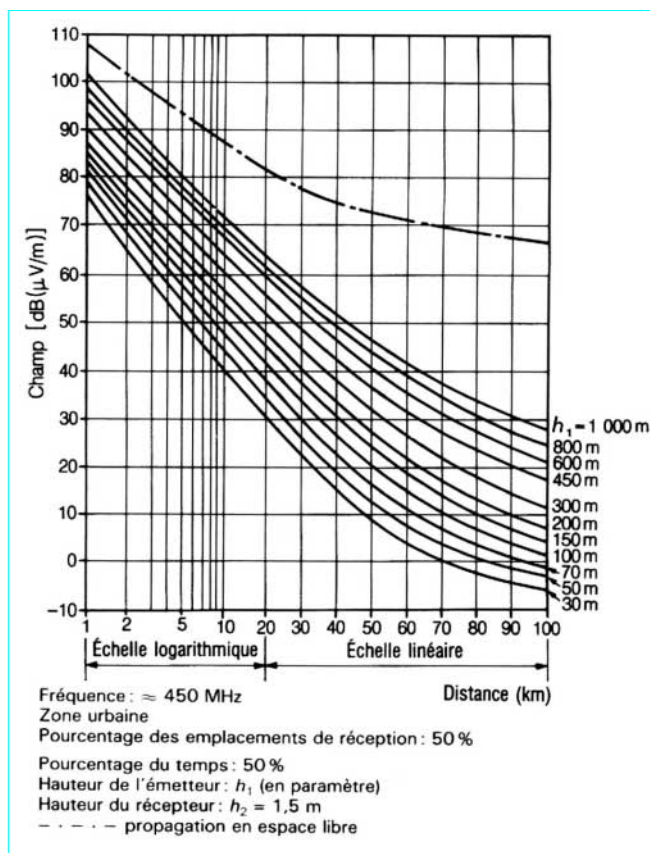


Figure 2 – Champ pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW

3. Caractérisation de l'amplitude d'un signal radioélectrique

En ondes entretenues, il importe assez peu de mesurer telle ou telle grandeur caractérisant l'amplitude d'un signal radioélectrique (**valeur moyenne**, **valeur de crête**, etc.). En revanche, pour des signaux de forme complexe, la valeur mesurée du champ ou du signal reçu dépend des caractéristiques de l'appareil de mesure, c'est-à-dire de sa largeur de bande, de son mode de détection, de son temps d'intégration, etc. C'est pourquoi les appareils doivent être conçus de manière à pouvoir mesurer une grandeur convenant au signal considéré.

Dans le cas d'un signal non aléatoire et de forme connue, la détermination de son niveau avec des conditions de détection et de largeur de bande bien définies est suffisante pour caractériser le signal mesuré ; dans le cas contraire (bruit impulsif ou bruit d'origine atmosphérique), il est préférable de mesurer le signal reçu avec deux ou plusieurs modes de détection et largeurs de bande (par exemple **valeur efficace** et **valeur de crête**) pour décrire correctement le phénomène.

3.1 Valeur moyenne

Le récepteur donne la valeur moyenne d'un signal si le circuit, qui suit le dispositif donnant une indication proportionnelle à l'enveloppe du signal, est conçu pour fournir une valeur moyenne

de la tension de sortie sur un intervalle de temps assez long afin que les fluctuations rapides n'apparaissent pas. On utilise la valeur moyenne pour de nombreuses classes d'émissions modulées, y compris les émissions de téléphonie à modulation d'amplitude ou de fréquence. On se sert également de cette valeur dans les émissions de télégraphie par tout ou rien, dans les cas où il est possible de maintenir l'émission en permanence sur la position de travail pendant la mesure. On peut aussi mesurer la valeur moyenne pour en déduire la valeur de crête de signaux ayant un facteur de forme élevé (impulsions courtes et espacées), c'est le cas, par exemple, des signaux images de télévision auxquels correspondent des signaux de synchronisation positifs. Bien entendu, pour obtenir la valeur de crête à partir de la valeur moyenne, on ajoute à celle-ci un facteur de correction.

3.2 Valeur de crête

Le récepteur donne la valeur de crête d'un signal lorsque l'appareil indicateur est conçu pour délivrer une tension de sortie correspondant à la tension instantanée maximale du signal. Ce résultat peut être obtenu avec l'un des appareils ci-après :

- **oscilloscope cathodique** connecté à la sortie de l'amplificateur à fréquence radioélectrique, ou de l'amplificateur à fréquence intermédiaire ;
- **appareil de mesure à seuil**, avec indication audible ou visuelle pour le dépassement de seuil ;
- **appareil de mesure de valeurs de crête** à mémoire et dispositif de remise à zéro, soit manuel, soit automatique avec un rythme déterminé, par exemple une fois par seconde.

La mesure des valeurs de crête est spécialement indiquée dans le cas de signaux ayant un facteur de forme peu élevé, par exemple les brouillages de nature impulsive ; toutefois, ces valeurs subissent souvent des fluctuations plus importantes que les valeurs de quasi-crête ou que les valeurs moyennes. Si la largeur de bande du signal à mesurer est plus grande que celle du mesureur de champ, cette circonstance influera sur la valeur de crête de l'émission, telle qu'elle est indiquée par l'appareil. Pour certains signaux simples, les résultats de mesure obtenus pour une largeur de bande donnée peuvent être étendus, moyennant une correction, à une autre largeur de bande mais si l'on désire faire des mesures comparatives, il est nécessaire de normaliser la largeur de bande des mesureurs de champ. Dans ces conditions, il convient de préciser la largeur de bande de l'appareil dans les comptes rendus de mesure.

3.3 Valeur de quasi-crête

La valeur de quasi-crête est celle que l'on obtient lorsque l'on pondère la tension de sortie du détecteur en agissant sur ses constantes de temps de charge τ_c et de décharge τ_d , ainsi que sur la constante de temps mécanique τ_m de l'appareil indicateur. Cette valeur est d'un emploi commode, et on l'utilise généralement dans le cas d'émissions manipulées ou pulsées, ou encore pour les émissions dont la valeur moyenne varie en fonction du niveau des signaux de modulation. Cette grandeur convient bien, en général, pour la mesure des brouillages de nature impulsive ; moyennant un choix convenable des constantes de temps de charge et de décharge, la mesure des valeurs de quasi-crête fournit directement une indication sur les effets audibles exercés par des signaux brouilleurs de forme quelconque sur des émissions modulées telles que la radiodiffusion en modulation d'amplitude.

En ce qui concerne les largeurs de bande, on peut faire des considérations analogues à celles exposées à propos de la mesure des valeurs de crête ; il faut choisir avec soin la largeur de bande ainsi que les constantes de temps de charge et de décharge pour l'adapter au type d'émission que l'on mesure et pour éviter des phénomènes de surcharge dans l'appareil.

Le CISPR a approuvé des valeurs normalisées qui sont indiquées dans le tableau 1. Ces valeurs normalisées sont définies exclusivement pour le mode de détection de quasi-crête. La figure 3 représente l'indication relative des détecteurs de crête et de quasi-crête en fonction de la fréquence d'impulsions injectées à l'entrée du récepteur de mesure.

3.4 Valeur efficace

La tension efficace est mesurée au moyen d'un couple thermo-électrique ou d'un circuit électronique quadratique, associé à un circuit approprié de mesure des valeurs moyennes. On mesure directement la puissance moyenne correspondant à la largeur de bande de l'appareil de mesure. Pour les émissions à spectre uniforme de fréquences, la tension efficace est proportionnelle à la racine carrée de la largeur de bande (la puissance moyenne étant proportionnelle à la largeur de bande). La valeur efficace est d'un emploi commode pour un grand nombre de mesures portant sur des phénomènes caractérisés par de grandes largeurs de bande, mais elle est particulièrement utile dans la mesure des bruits atmosphériques. Comme le carré d'une grandeur varie dans des proportions plus importantes que la grandeur elle-même, l'appareil de mesure doit avoir une dynamique et des constantes de temps plus grandes. Pour la mesure des bruits atmosphériques, on a obtenu des résultats satisfaisants avec une constante de temps de 500 s.

3.5 Valeur logarithmique moyenne

On obtient la valeur logarithmique moyenne en intercalant un amplificateur logarithmique en fréquence intermédiaire avant le circuit détecteur (figure 4). Cet amplificateur permet d'augmenter de façon importante la dynamique de mesure, mais la mesure du bruit avec un tel amplificateur est en général difficile et nécessite d'introduire des corrections. Les circuits logarithmiques sont étalonnés avec des signaux sinusoïdaux et, lorsque le signal analysé n'est pas sinusoïdal, les termes correctifs peuvent dépendre de la nature du signal.

3.6 Influence de la largeur de bande du récepteur

On a signalé à plusieurs reprises dans ce qui précède l'influence de la largeur de bande. On va donner à ce sujet quelques indications complémentaires.

Tableau 1 – Choix des largeurs de bande et des constantes de temps des appareils de mesure pour diverses gammes de fréquences, conformément aux Recommandations du CISPR

Gamme de fréquences (MHz)	Largeur de bande à 6 dB (kHz)	Constante de temps de charge τ_c (ms)	Constante de temps de décharge τ_d (ms)	Constante de temps mécanique τ_m (ms)
$0,009 < f \leq 0,15$	0,2	45	500	160
$0,15 < f \leq 30$	9	1	160	160
$30 < f \leq 1\,000$	120	1	550	100

3.6.1 Signaux à bande étroite

Si la largeur occupée par le spectre de fréquences du signal à mesurer est nettement plus petite que la largeur de bande du récepteur, l'indication de l'appareil de sortie est indépendante de cette largeur de bande. Un élargissement de la bande facilite éventuellement la mesure, mais réduit le rapport signal/bruit. Les mesureurs de champ sont construits de telle façon que, dans le cas d'un signal sinusoïdal non modulé, l'indication de l'appareil de sortie soit la même, quel que soit le type de détection utilisé, et qu'elle corresponde à la tension efficace.

3.6.2 Signaux à bande large

Si la largeur occupée par le spectre de fréquences du signal à mesurer est nettement plus grande que la largeur de bande du récepteur, l'indication de l'appareil de sortie dépend à la fois de cette largeur de bande, du type de détection utilisé et des caractéristiques spectrales du signal à mesurer. On peut cependant donner dans certains cas des indications plus précises, en particulier si toutes les composantes spectrales ont à peu près la même amplitude dans une gamme de fréquences très étendue et si l'on emploie un détecteur de crête ou d'enveloppe.

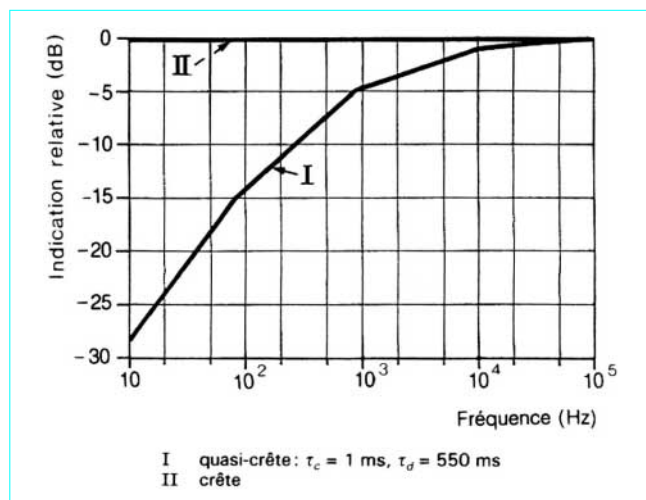


Figure 3 – Indications relatives des détecteurs de crête et de quasi-crête en fonction de la fréquence de répétition des impulsions à l'entrée du récepteur

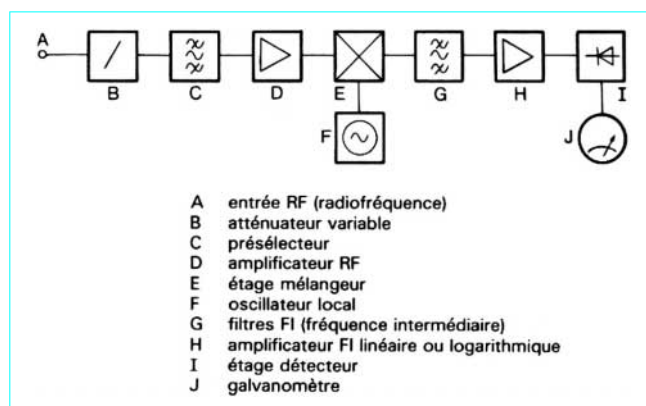


Figure 4 – Schéma synoptique simplifié d'un récepteur de mesure

Ce dernier cas se décompose à son tour en plusieurs autres, suivant la corrélation qui existe entre les composantes spectrales. Si les diverses composantes sont totalement décorrélées (cas du bruit blanc), la puissance de sortie est proportionnelle à la largeur de bande et, par suite, la tension de sortie est proportionnelle à la racine carrée de cette largeur de bande. Si, au contraire, la phase varie lentement avec la fréquence de la composante (cas d'une impulsion ou d'une suite d'impulsions très courtes), la tension de sortie est proportionnelle à la largeur de bande (et à la durée des impulsions). C'est pourquoi l'on utilise couramment pour la mesure des bruits impulsifs le microvolt par kilohertz (ou par mégahertz).

Pour la mesure des perturbations, les remarques qui précèdent permettent de déterminer si ces perturbations possèdent un spectre continu aléatoire ou ont un caractère impulsif. En passant sur une largeur de bande 10 fois plus étroite, le niveau reçu baisse de 10 dB dans le cas d'un bruit blanc purement aléatoire et il baisse de 20 dB dans le cas d'un bruit purement impulsif. Evidemment, dans le cas de perturbations plus complexes, on peut trouver des valeurs différentes.

La relation mathématique existant entre le niveau mesuré et la bande passante du récepteur est de la forme :

$$V = a \cdot B^\alpha$$

en désignant par V la tension RF (radiofréquence) du signal à large bande mesuré avec un récepteur dont la bande passante en fréquence intermédiaire est B ; a est un coefficient de proportionnalité et α un exposant caractéristique du signal à large bande, généralement compris entre 0,5 et 1.

Si l'on exprime les mesures en décibels, le niveau V_0 en dB(μV) se met alors sous la forme suivante :

$$V_0 = 20 \lg V = 20 \lg a + 20\alpha \lg B$$

où V est exprimé en microvolts et B en hertz.

4. Appareils de mesure de champ

4.1 Caractéristiques principales

Un appareil de mesure de champ se caractérise par certaines qualités particulières et doit posséder en outre des dispositifs spécifiques. La figure 4 représente le schéma synoptique simplifié d'un récepteur de mesure récent.

On distingue deux types d'appareils de mesure de champ :

- les récepteurs de mesure ;
- les analyseurs de spectre.

Ces appareils sont décrits en détail au paragraphe 4.2, mais ils ont en commun un certain nombre de caractéristiques que l'on va d'abord examiner.

4.1.1 Gamme de fréquences

La gamme de fréquences couverte par chaque récepteur doit être la plus étendue possible, de façon à réduire le nombre d'appareils nécessaires. En outre, pour faciliter les mesures panoramiques en fréquence, l'appareil doit avoir le moins de sous-gammes possibles.

La technologie la plus récente permet aux appareils de couvrir des gammes de fréquences très étendues. Il existe, par exemple, des appareils pouvant couvrir en deux sous-gammes seulement la bande 100 Hz à 22 GHz, avec des performances tout à fait convenables.

4.1.2 Sensibilité et facteur de bruit

Un appareil de mesure doit être sensible, c'est-à-dire qu'il doit permettre de mesurer le signal radiofréquence le plus faible possible. Les appareils les plus sensibles permettent de mesurer des signaux de l'ordre d'un dixième ou de quelques centièmes de microvolt [-20 à -30 dB(μV)].

On caractérise en général la **sensibilité d'un récepteur** par le niveau du signal dont la puissance est égale à celle du bruit propre du récepteur. C'est donc le niveau du signal qui augmente la puissance de sortie d'un facteur 2 (3 dB) par rapport à la puissance de sortie en l'absence de signal. Si on désigne par S la puissance du signal, N la puissance du bruit propre de l'appareil, on a alors la relation :

$$10 \lg [(S + N)/N] = 3$$

La sensibilité du récepteur, exprimée en dB (W) est donc égale à $10 \lg N$.

Par ailleurs, on définit le **facteur de bruit** d'un récepteur comme étant le rapport F de la densité spectrale moyenne (N/B) de bruit dans une bande B au produit de la constante de Boltzmann k par une température de référence T_0 , égale à environ 290 K :

$$F = (N/B) / (k \cdot T_0)$$

La notion de sensibilité intègre à la fois le facteur de bruit et la bande passante d'analyse. On préfère donc utiliser la notion de facteur de bruit pour comparer les performances des appareils de mesure de champ.

Le facteur de bruit d'un récepteur est habituellement exprimé en décibels. Pour les récepteurs de mesure de champ, ce facteur est généralement de l'ordre de 15 dB, alors que pour les analyseurs de spectre du commerce il est plutôt de l'ordre de 30 dB (les récepteurs utilisés en télécommunications sur des fréquences fixes ont des facteurs de bruits généralement inférieurs à 10 dB).

La puissance de bruit propre du récepteur, exprimée en dB(W), est égale à :

$$10 \lg N = F + 10 \lg (k \cdot T_0) + 10 \lg B$$

avec $10 \lg (k \cdot T_0) = -204$ dB (W/Hz), car $k = 1,380\,662 \times 10^{-23}$ J/K et $T_0 = 290$ K, B (Hz) bande passante d'analyse en fréquence intermédiaire.

Dans ces conditions, si l'impédance de l'appareil de mesure est de 50 Ω, la sensibilité $20 \lg V_s$ du récepteur exprimée en tension [dB (μV)] satisfait la relation suivante :

$$10 \lg N = 20 \lg V_s - 10 \lg (50) - 120$$

d'où l'on déduit :

$$20 \lg V_s = 10 \lg N + 137 = F - 204 + 10 \lg B + 137$$

avec $20 \lg V_s$ exprimé en dB(μV) et $10 \lg N$ en dB(W).

Par conséquent, la relation liant V_s au facteur de bruit F exprimé en décibels et à la bande passante du récepteur est la suivante :

$$20 \lg V_s = F + 10 \lg (B) - 67$$

avec V_s exprimé en μV, F en dB et B en Hz.

4.1.3 Dynamique de mesure

Les niveaux reçus peuvent varier dans des rapports énormes. Il est donc nécessaire que les récepteurs aient une dynamique extrêmement étendue. Cela est obtenu généralement par un amplificateur logarithmique ayant au moins une dynamique de 60 à 80 dB, lui-même précédé d'un atténuateur variable de 0 à 100 dB, étalonné. On peut ainsi mesurer par exemple une tension quelconque entre 0,01 μV soit -40 dB(μV) et 1 V soit 120 dB(μV).

Il peut arriver que l'on ait à mesurer un niveau faible sur une fréquence voisine d'un émetteur puissant. Cela nécessite non seulement une grande sélectivité des amplificateurs à fréquence intermédiaire mais aussi qu'il y ait des circuits sélectifs (système de présélection) dès l'entrée du récepteur pour éviter les phénomènes d'intermodulation dans le premier étage.

Enfin, pour la même raison, il faut que le récepteur soit parfaitement blindé électriquement afin que les mesures de niveaux très faibles ne soient pas perturbées par des champs élevés pénétrant dans le récepteur par d'autres chemins que les bornes d'entrée (fils d'alimentation, axes des boutons de commande, cadrans des appareils de mesure, etc.).

4.1.4 Sélectivité. Stabilité

Un appareil de mesure de champ est en fait un microvoltmètre sélectif RF (radiofréquence). Il doit posséder plusieurs sélectivités pour pouvoir déterminer la nature du signal mesuré, signal qui peut parfois s'avérer d'une grande complexité (parasites radioélectriques) et dans lequel sont mélangés des phénomènes à bandes étroites et des signaux à large bande. Les gabarits des filtres d'analyse jouent également un rôle très important car, pour les signaux à large bande, les résultats de mesure seront différents suivant ces caractéristiques de filtrage des circuits d'analyse.

Les appareils de mesure de champ peuvent avoir soit des filtres gaussiens (c'est le cas de certains types d'analyseurs de spectre), soit des filtres rectangulaires, étalonnés au moyen d'impulsions à large bande.

Les filtres gaussiens sont optimisés pour les mesures de bruit blanc. Pour les mesures de signaux impulsifs à large bande, c'est en général la bande impulsienne à 6 dB qui est importante. Pour un filtre gaussien, elle est égale à environ 1,6 fois la bande passante à 3 dB.

$$B_{6dB} \approx 1,6B_{3dB}$$

Les bandes passantes des filtres en fréquence intermédiaire peuvent s'échelonner de 10 Hz à 3 MHz suivant le type d'appareil de mesure (analyseur de spectre ou récepteur). Les bandes très étroites impliquent que les oscillateurs locaux des appareils soient très stables. De plus en plus apparaissent des mesureurs de champ à synthétiseurs où la référence de fréquence est un oscillateur à quartz ultra-stable. Ces appareils permettent, outre une mesure de niveau précise, la mesure de la fréquence reçue avec une grande précision. Cela est très important afin de pouvoir lever le doute soit sur un émetteur, soit sur des signaux parasites, et en permettre une localisation ou en détecter l'origine.

4.1.5 Modes de détection

Comme il a été indiqué (§ 4.1.4), un mesureur de champ doit posséder plusieurs circuits de détection et démodulation pour analyser les signaux RF souvent complexes ou pour pouvoir assurer un contrôle auditif du signal mesuré.

La plupart des appareils de mesure de champ ont les modes de détection suivants :

- détecteur de crête ou d'enveloppe ;
- détecteur de quasi-crête défini par le CISPR ;
- détecteur de valeur moyenne.

Ces détecteurs sont associés à des amplificateurs linéaires ou logarithmiques qui permettent le contrôle auditif des signaux modulés en amplitude, en fréquence ou en bande latérale unique.

4.1.6 Étalonnage. Précision de mesure

Bien qu'il soit toujours possible d'étalonner un récepteur avec un générateur extérieur, les récepteurs de mesure comportent généralement un système interne d'étalonnage constitué par un générateur d'impulsions très brèves, ayant donc un spectre très large couvrant

toute la gamme du récepteur, ou par un générateur sinusoïdal très précis permettant l'étalonnage à une fréquence et corrigeant automatiquement la courbe de réponse de l'appareil sur toute sa gamme de fréquences.

Dans les appareils de mesure actuels, l'introduction des microprocesseurs a permis de numériser une grande partie de l'électronique de ces appareils et de les étalonner avec des précisions de l'ordre du décibel ou même mieux. Les corrections internes sont stockées dans des mémoires numériques qui se remettent à jour à chaque étalonnage.

4.1.7 Équipements auxiliaires. Périphériques

Différents équipements auxiliaires peuvent généralement être connectés à la sortie de l'appareil pour faciliter l'exploitation et le traitement des mesures. Des tables traçantes peuvent être connectées en sortie du récepteur, le déplacement étant asservi, en abscisse, à la fréquence et, en ordonnée, au niveau RF mesuré. Outre cette possibilité, les appareils les plus récents sont programmables grâce au bus CEI 625 (IEEE 488) et peuvent à la fois être commandés par un micro-ordinateur et transférer les informations fréquence-niveau au micro-ordinateur.

La dernière génération d'appareils est elle-même dotée de micro-ordinateurs intégrant des possibilités de commande numérique, de calcul, d'acquisition et de gestion de périphériques (imprimantes et table traçante, en attendant l'unité de disquettes intégrée à l'appareil de mesure).

4.1.8 Alimentation. Encombrement. Masse

Ces caractéristiques dépendent surtout de l'utilisation prévue pour l'appareil. On distingue essentiellement :

- des **appareils de laboratoire** pouvant servir de référence et pouvant être programmés. Ces appareils ont en général des performances élevées mais sont très onéreux. En outre, ils sont très lourds et se prêtent assez peu aux interventions rapides à l'extérieur ;
- des **appareils utilisables à l'extérieur** (c'est le cas de la plupart des appareils destinés à mesurer le champ des émetteurs radioélectriques) ; ils doivent donc être facilement transportables et très robustes ; en outre, ils doivent pouvoir être alimentés sur batterie ; compte tenu de la faible consommation des appareils récents (20 à 30 W), une batterie rechargeable est incorporée à l'appareil.

4.2 Types d'appareils de mesure

Il existe deux types d'appareils de mesure de champ : les **récepteurs de mesure** et les **analyseurs de spectre**. Bien que, pendant longtemps, les récepteurs de mesure aient été les appareils les plus appropriés pour les mesures de champ, les analyseurs de spectre essaient de prendre la relève des précédents et y réussissent déjà dans de nombreuses applications.

4.2.1 Récepteurs de mesure

Les récepteurs de mesure de champ sont essentiellement des microvoltmètres sélectifs fonctionnant comme des récepteurs radio superhétérodynes. Ils ont pour vocation initiale de mesurer la tension ou la puissance radiofréquence à leur entrée. L'impédance d'entrée est de 50 ou 75 Ω.

Un récepteur de mesure (figure 4) est constitué par un amplificateur sélectif RF, placé après un atténuateur d'entrée commutable ; en sortie de l'amplificateur sélectif se trouvent un ou deux changements de fréquence afin de filtrer les signaux reçus avec des bandes passantes suffisamment étroites pour avoir un bon rapport

signal/bruit. En fréquence intermédiaire, il y a des filtres d'analyse commutables et une chaîne d'amplification. Ensuite, on a la possibilité de sélectionner un détecteur parmi plusieurs (de crête, de quasi-crête, de valeur moyenne, etc. ; § 3), un galvanomètre ou un affichage numérique. De plus, la plupart des récepteurs de mesure disposent de démodulateurs permettant l'identification des signaux mesurés, en particulier pour la radiodiffusion.

En général, les récepteurs de mesure sont très bien blindés électromagnétiquement et ont une très bonne protection contre l'intermodulation.

On doit noter également l'existence de mesureurs de champ apériodiques qui servent à détecter et à mesurer les champs ou les puissances surfaciques élevées, et qui sont décrits au paragraphe 4.2.4.

4.2.2 Analyseurs de spectre

Les analyseurs de spectre ont été développés pour étudier les propriétés des signaux radars pendant la période 1940-1950. Connus initialement sous le nom de récepteurs panoramiques, ils se différencient assez peu actuellement d'un récepteur de mesure classique. Utilisant également le principe du récepteur hétérodyne, ils diffèrent du récepteur de mesure par certains circuits :

- la tête radiofréquence ne possède pas un filtre sélectif accordable, mais un filtre passe-bas englobant toute la gamme de l'analyseur ;
- les filtres d'analyse (ou de résolution) sont généralement optimisés pour les mesures de bruit plutôt que pour les mesures de rayonnement parasite à large bande ;
- les circuits détecteurs ne comportaient pas de détection quasi-crête, mais depuis l'année 1985 sont apparus sur le marché des analyseurs de spectre qui satisfont de plus en plus, à ce point de vue, aux recommandations du CISPR ;
- l'analyseur de spectre dispose en sortie d'un écran cathodique qui permet de visualiser en temps réel la représentation de l'amplitude d'un signal en fonction de la fréquence, entre deux fréquences f_1 et f_2 que l'on peut choisir.

4.2.3 Comparaison des possibilités de chacun des appareils

Bien que globalement les possibilités de mesure des deux types d'appareils soient semblables, on ne peut pas toujours substituer un analyseur de spectre à un mesureur de champ ou *vice versa*.

Il faut noter cependant que les performances des deux types d'appareils se rapprochent, car les constructeurs de récepteurs de mesure adjoignent maintenant des périphériques de visualisation à leurs récepteurs et les fabricants d'analyseurs de spectre modifient leurs appareils afin de les transformer en récepteurs à hautes performances.

En règle générale, pour dégrossir les problèmes de rayonnement, on pourra utiliser un analyseur de spectre moyen, mais pour les mesures de précision, on se fiera plutôt aux récepteurs de mesure ou aux analyseurs de spectre haut de gamme.

En fait, avant d'acquérir un de ces coûteux matériels, il faut bien analyser son besoin et étudier l'offre existant sur le marché dans les deux gammes de produits.

4.2.4 Mesureurs de champ apériodiques

Pour certaines applications spécifiques, on a de plus en plus besoin de mesurer des champs élevés (par exemple pour des mesures de champ à proximité immédiate d'émetteurs radioélectriques ou d'appareils industriels, scientifiques ou médicaux utilisant l'énergie radiofréquence, ou pour le contrôle du champ radiofréquence lors d'essais d'immunité radioélectrique d'équipements, etc.). Pour cela, il suffit de disposer d'un mesureur de champ non sélectif.

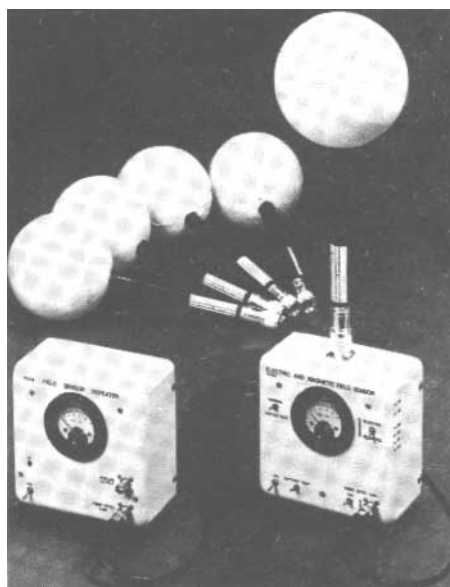


Figure 5 – Mesureur de champ apériodique (doc. Aeritalia)

Ces mesureurs de champ se composent d'antennes doublets sur lesquelles sont montées des diodes de détection et qui sont disposées suivant les axes orthogonaux ; la combinaison des signaux détectés suivant les trois axes permet d'obtenir la valeur du champ de façon assez précise. Des champs supérieurs ou égaux à 1 V/m peuvent être ainsi mesurés. Du fait de leur non-sélectivité, ces mesureurs de champ ne permettent pas de mesurer plusieurs champs de forte amplitude simultanément mais seulement le plus élevé lorsqu'il y en a un beaucoup plus élevé que les autres, et une combinaison des champs lorsqu'il y en a plusieurs de valeurs proches les uns des autres.

La figure 5 montre un tel mesureur de champ.

5. Antennes utilisées pour les mesures de champ

5.1 Rappels de notions sur les antennes

Nota : le lecteur pourra se reporter aux articles *Antennes. Bases et principes* [E 3 280], *Antennes. Différents types* [E 3 282], *Antennes. Techniques* [E 3 284] et *Antennes. Éléments connexes* [E 3 288] dans ce traité.

Un récepteur peut être considéré comme un microvoltmètre ou un microwattmètre sélectif étalonné. Il permet donc de connaître le niveau (tension ou puissance) appliqué à ses bornes d'entrée.

Pour en déduire une grandeur caractéristique de l'onde incidente (par exemple, le champ électrique ou la puissance surfacique), on doit connaître en outre les caractéristiques radioélectriques de l'antenne, puisque celle-ci assure le couplage entre l'onde incidente et le récepteur. Il ne faut cependant pas perdre de vue que, pour les fréquences relativement basses, les caractéristiques de l'antenne dépendent dans une certaine mesure de la proximité du sol et des obstacles.

Aux fréquences inférieures à environ 1 GHz, on exprime en général les résultats sous forme de champ (électrique ou magnétique) et la caractéristique de l'antenne la mieux adaptée est la hauteur effective, d'où l'on déduit la grandeur couramment utilisée : le facteur d'antenne ou facteur de conversion k , qui est le rapport entre le

champ électrique au voisinage de l'antenne et la tension radiofréquence à l'entrée du récepteur, si le câble de liaison entre l'antenne et le récepteur est sans perte.

Ce facteur, qui est théoriquement égal au double de l'inverse de la hauteur effective lorsque l'antenne est adaptée au récepteur, est fourni par le constructeur de l'antenne. Il est habituellement exprimé sous une forme logarithmique (en dB) :

$$K = 20 \lg k$$

Il est représenté par une courbe $K(f)$ (figure 6), car les caractéristiques de la plupart des antennes sont variables avec la fréquence.

La relation la plus générale liant la tension mesurée à l'entrée du récepteur et le champ est alors la suivante :

$$E = K + L + V$$

avec E [dB(μV/m)] champ à mesurer,

V [dB(μV)] tension à l'entrée du récepteur,

L (dB) valeur des pertes dans le câble de liaison entre l'antenne et le mesureur de champ,

K [dB(m⁻¹)] facteur d'antenne ou facteur de conversion.

Aux fréquences supérieures à 1 GHz, on exprime plutôt les résultats sous la forme de puissance surfacique ou de puissance reçue sur une antenne de référence (en général isotrope).

La caractéristique de l'antenne la mieux adaptée est alors la directivité, qui est égale au gain isotrope si l'antenne est sans perte, ou l'aire équivalente, qui est proportionnelle à la directivité.

Il existe entre ces différentes grandeurs les relations suivantes :

$$D = \pi \frac{Z_0}{R_r} \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2$$

$$\Sigma = \frac{\lambda^2 D}{4\pi} = \frac{1}{4} \frac{Z_0}{R_r} h^2$$

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{4 Z_0}{\pi D Z_{rec}}} = \frac{1}{h} \left(1 + \frac{R_r}{Z_{rec}} \right)$$

avec D (sans dimension) directivité, égale au gain isotrope si l'antenne est sans perte,

h (m) hauteur effective de l'antenne,

R_r (Ω) résistance de rayonnement de l'antenne,

Z_0 (Ω) impédance intrinsèque du milieu (égale à 377 Ω dans le vide ou dans l'air),

λ (m) longueur d'onde,

Σ (m²) aire équivalente,

k (m⁻¹) facteur d'antenne,

Z_{rec} (Ω) impédance d'entrée du récepteur (50 ou 75 Ω en général).

Les valeurs de D , Σ , k et h sont relatives à une direction donnée. Si la direction n'est pas précisée, on admet implicitement que les grandeurs correspondent à la direction pour laquelle le niveau de champ ou de puissance surfacique est maximal.

On peut alors passer des niveaux mesurés à l'entrée du récepteur (tension ou puissance) aux caractéristiques de l'onde incidente (champ ou puissance surfacique) par les relations indiquées dans le tableau 2.

5.2 Choix du type d'antenne

Le choix du type d'antenne à utiliser dépend des caractéristiques de l'onde que l'on veut mesurer, de la fréquence, du niveau de l'onde incidente, etc.

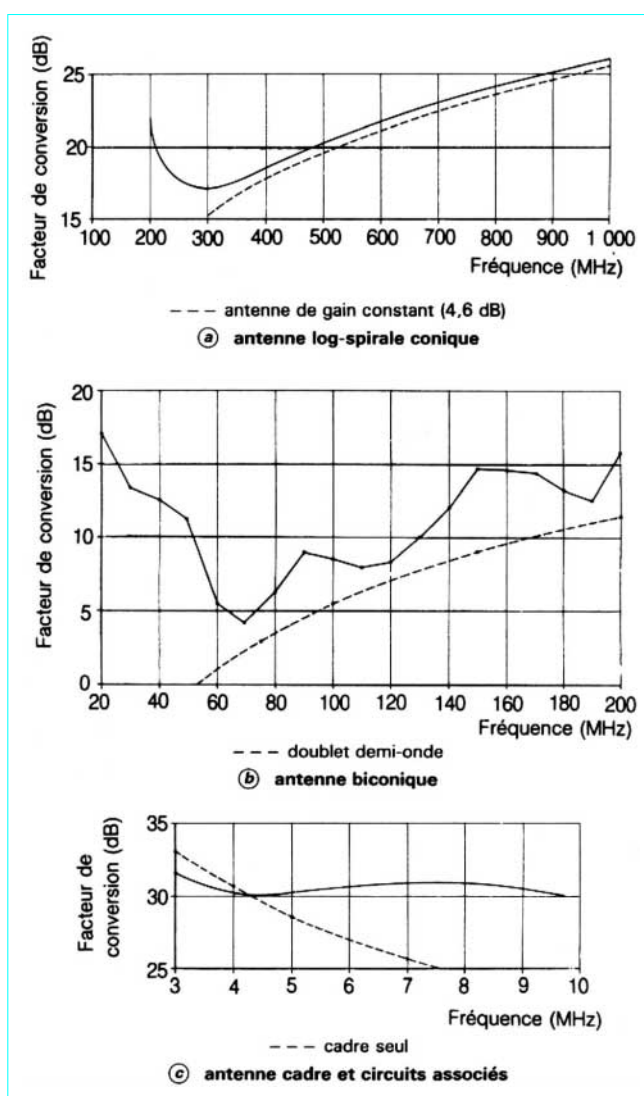


Figure 6 – Facteur de conversion pour différents types d'antennes

Dans certains cas, surtout en ondes relativement longues, on s'intéresse seulement au niveau global du champ. Cela est encore vrai même pour des ondes beaucoup plus courtes si, on peut mesurer le champ d'un émetteur connu. Dans d'autres cas, on peut vouloir effectuer une analyse de l'onde reçue et déterminer par exemple sa direction approximative d'arrivée et sa polarisation. Le cas où l'on s'intéresse avec précision à la direction d'arrivée constitue la radiogoniométrie (article *Radiolocalisation. Radionavigation* [E 6 600] dans le traité Télécoms).

Si l'on veut faire des mesures à une seule fréquence, on peut utiliser une antenne d'un type quelconque à condition que ses caractéristiques électriques soient bien connues à cette fréquence. C'est ce qui se passe en particulier dans le cas des études de propagation, où l'on utilise souvent des antennes très directives mais à bande étroite.

Si l'on veut faire une étude complète ou panoramique d'une bande de fréquences relativement étendue, par exemple d'une octave, on doit choisir une antenne dont les caractéristiques varient peu dans cette bande, afin que les corrections de la fréquence soient les plus petites possibles.

Tableau 2 – Relations mathématiques liant les différentes grandeurs entre elles

Forme numérique	Forme logarithmique
$e = kv/\sqrt{A}$ <p>avec e ($\mu\text{V/m}$) champ, k (m^{-1}) facteur d'antenne, v (μV) tension à l'entrée du récepteur, A atténuation en puissance du câble de liaison (nombre < 1).</p>	$E = K + V + L$ <p>avec E [$\text{dB}(\mu\text{V/m})$] = $20 \lg e$, K [$\text{dB}(\text{m}^{-1})$] = $20 \lg k$, V [$\text{dB}(\mu\text{V})$] = $20 \lg v$, L (dB) = $20 \lg \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \right) = -10 \lg A$.</p>
$P_s = \frac{P_r}{A\Sigma}$ <p>avec P_s (W/m^2) puissance surfacique, P_r (W) puissance reçue au niveau du récepteur, Σ (m^2) aire équivalente, A atténuation en puissance du câble de liaison (nombre < 1).</p>	$P_s = P_r + L - 10 \lg \Sigma$ <p>avec P_s [$\text{dB}(\text{W/m}^2)$] = $10 \lg (P_s)$, P_r [$\text{dB}(\text{W})$] = $10 \lg (P_r)$, Σ (m^2) aire équivalente, L (dB) = $20 \lg \left(\frac{1}{\sqrt{A}} \right) = -10 \lg A$.</p>

Il existe des antennes dites apériodiques, dont certaines caractéristiques sont en principe constantes dans une très large bande de fréquences. Ces antennes appartiennent à deux types différents : d'une part, les **antennes équiangulaires** dans lesquelles les paramètres géométriques sont définis par des angles et, d'autre part, les **antennes log-périodiques** constituées d'éléments couplés dont les fréquences d'accord sont en progression géométrique. De telles antennes sont évidemment utilisées pour les mesures de champs (discons, antennes log-spirales, log-périodiques). Cependant, leurs dimensions deviennent vite prohibitives si l'on veut étendre leur gamme de fréquences vers le bas. Pour cette raison, on réserve leur emploi aux fréquences supérieures à 200 MHz environ.

Il existe aussi des antennes qui, sans être par nature apériodiques, ont cependant une largeur de bande assez grande, laquelle peut être encore augmentée par certains artifices, par exemple en utilisant des conducteurs de section très importante et non cylindrique. Pour éviter que ce grossissement des conducteurs n'accroisse trop la masse de l'antenne, ces conducteurs sont en fait réalisés par un ensemble de petits conducteurs mis en parallèle (antennes biconiques ; figure 7). On obtient ainsi des largeurs de bande de plusieurs octaves.

Enfin, on peut associer à l'antenne des circuits passifs ou actifs qui modifient profondément ses caractéristiques d'impédance. Cette méthode est surtout utilisée en ondes très longues.

Suivant la fréquence, on est conduit, pour les mesures de champ, à utiliser principalement les types d'antennes suivants.

■ Fréquences supérieures à 200 MHz :

— pour des mesures sur des gammes de fréquences étendues, les antennes apériodiques fournissent une bonne solution ;

Exemple : avec une antenne de type log-spirale conique (figure 8), il suffit de deux modèles pour couvrir toute la gamme 200 MHz à 10 GHz. La polarisation est circulaire et la directivité dans l'axe est de l'ordre de 5 à 10 dB. Pour une polarisation verticale on peut utiliser aussi l'antenne discone, surtout au-dessus de 1 GHz ;

— si l'on est au-dessus de 400 MHz et si l'on se limite à des bandes de fréquences d'une octave environ (c'est à peu près l'étendue de chaque sous-gamme des récepteurs), on peut utiliser des cornets spécialement étudiés pour avoir une large bande ;

— enfin, au-delà de 6 à 7 GHz, le cornet peut être placé au foyer d'un paraboloïde si l'on désire une directivité ou une sensibilité plus grande.



Figure 7 – Antenne biconique 20 à 200 MHz (cliché CNET)



Figure 8 – Antenne log-spirale conique 200 MHz à 1 GHz (cliché CNET)

■ **Fréquences comprises entre 20 MHz et 200 MHz** : dans cette bande de fréquences, l'antenne la plus pratique est le *douplet biconique* (figure 7), dont un seul modèle peut couvrir toute la bande, grâce à sa forme spéciale et aux circuits passifs associés, y compris un transformateur d'impédance symétrique-dissymétrique. Ces circuits sont déterminés pour maintenir une hauteur effective aussi constante que possible dans la bande, mais au prix de pertes relativement importantes, surtout aux fréquences basses (la hauteur effective d'un doublet demi-onde est proportionnelle à la longueur d'onde).

■ **Fréquences inférieures à 20 MHz** : dans cette bande de fréquences, les dimensions des antennes sont toujours petites par rapport à la longueur d'onde, et ces antennes rayonnent comme un doublet. On utilise deux types principaux :

- d'une part le *douplet électrique* (ou plutôt généralement le demi-doublet ou antenne verticale courte) ;
- d'autre part le *douplet magnétique* (ou *cadre* ; figure 9).

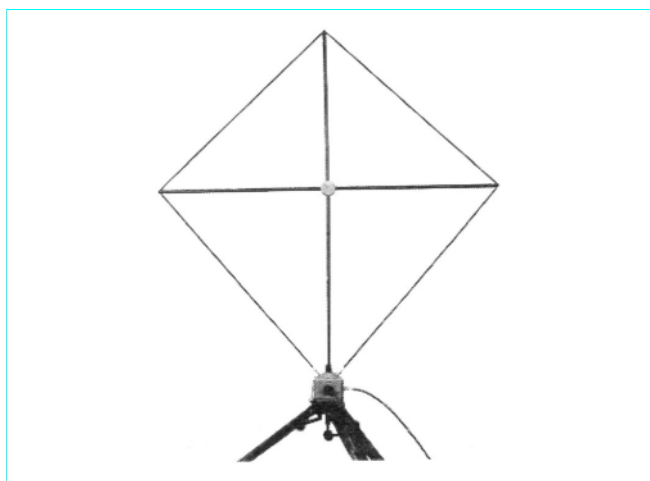


Figure 9 – Antenne cadre 150 kHz à 30 MHz ou 10 kHz à 250 kHz (cliché CNET)



Figure 10 – Antenne fouet 10 kHz à 40 MHz (cliché CNET)

Du fait de leur petitesse en longueur d'onde, ces antennes ont dans leur impédance une partie réactive très forte. On leur associe donc un circuit qui compense cette partie réactive et maintient une hauteur effective à peu près constante dans une bande de fréquences étendue.

Exemple : une antenne cadre (figure 9) peut couvrir, avec le même cadre, une bande de fréquences allant de 150 kHz à 20 ou 30 MHz, mais elle comporte 5 ou 6 circuits commutables qui subdivisent cette bande extrêmement large en 5 ou 6 sous-bandes dans chacune desquelles l'impédance et la hauteur effective restent à peu près constantes (pour un cadre de dimensions données et sans circuit associé, la hauteur effective est proportionnelle à la fréquence).

Les considérations qui précèdent sont illustrées par la figure 6 qui représente des courbes de facteurs de conversion, relevées sur les systèmes d'antennes d'un mesureur de champ du commerce. Chaque système d'antenne comporte non seulement l'élément rayonnant mais aussi des circuits associés, entièrement passifs pour les fréquences élevées et parfois actifs pour les fréquences basses (antenne fouet ; figure 10). La courbe d'une antenne idéale sans circuits associés a été représentée en tirets sur la figure 6. On voit que, pour l'antenne cadre, la présence des circuits associés modifie complètement la courbe. Pour les autres, la modification est moins profonde. L'antenne biconique se comporte pratiquement comme un doublet demi-onde de 70 à 200 MHz, et l'antenne log-spirale conique est effectivement à peu près apériodique de 300 à 1 000 MHz, mais son gain décroît au-dessous.

Signalons enfin que l'on peut être amené à utiliser dans certains cas des cadres de très petites dimensions, par exemple pour étudier les fuites d'un blindage ou détecter des sources très localisées de parasites. On peut aussi utiliser des coupleurs (pinces transformateurs) pour mesurer les fréquences parasites qui circulent sur des câbles d'alimentation.

6. Méthodes et procédures de mesure de champ

6.1 Mesure du rayonnement d'émetteurs radioélectriques

Autour d'un émetteur radioélectrique destiné à un service point à zone, on peut envisager la détermination de plusieurs caractéristiques :

- la zone de couverture ;
- le diagramme de rayonnement ;
- la puissance isotrope rayonnée équivalente ;
- les rayonnements non essentiels ou harmoniques.

Ces opérations impliquent nécessairement des mesures de champ à diverses distances et dans différents azimuts.

Pour cela on doit choisir :

- les distances de l'émetteur auxquelles on va placer l'antenne de mesure ;
- la hauteur par rapport au sol à laquelle il faut placer cette antenne ;
- la polarisation de l'antenne de mesure.

En ce qui concerne la radiodiffusion, le CCIR donne des indications dans le Rapport 228 [6] [7] [8] [9] [10] sur la manière de procéder pour caractériser la zone de couverture. À titre d'exemple, la figure 11 extraite de ce rapport montre une répartition possible des points de mesure autour d'un émetteur de télévision de 100 kW de puissance apparente rayonnée.

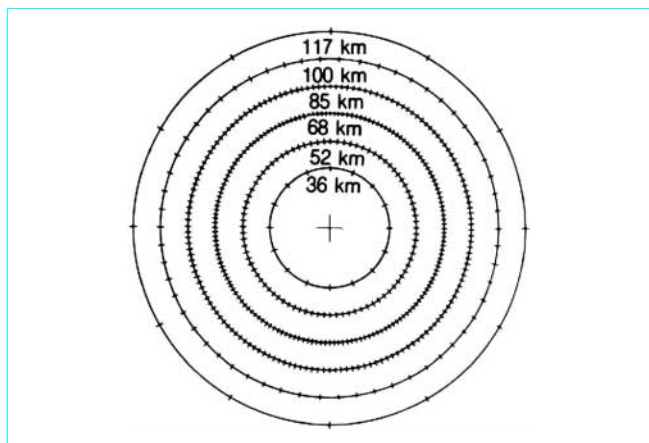


Figure 11 – Disposition possible des emplacements de mesure de champ autour d'une station de radiodiffusion, pour déterminer la zone de service (extrait du Rapport 228 du CCIR)

On voit que la densité des points de mesure doit être maximale aux distances qui sont considérées comme étant en limite de zone de service, c'est-à-dire aux distances où le pourcentage des emplacements de bonne réception descend au-dessous de 50 %. Cette distance dépend de la puissance de l'émetteur et de la hauteur de l'antenne d'émission au-dessus de l'altitude moyenne du terrain. En outre, cette répartition théorique doit être modifiée pour tenir compte de la topographie et de la répartition de la population. Il est évidemment inutile de faire des mesures sur des sommets. Au contraire, la densité des points de mesure doit être augmentée dans les vallées très peuplées.

Un point très important est le choix de la hauteur au-dessus du sol où doit être faite la mesure. Le Rapport 228 du CCIR indique que, pour la radiodiffusion, la mesure devrait être faite à 10 m au-dessus du sol dans les gammes de fréquences réservées à la télévision car cette hauteur est assez représentative de la hauteur moyenne des antennes placées sur des maisons individuelles. Cependant, la mesure à une telle hauteur n'est pas toujours facile et pour cela il serait intéressant de connaître la variation du champ avec la hauteur.

Si l'on est en visibilité de l'émetteur, l'antenne de réception peut être atteinte à la fois par le rayon direct et par le rayon réfléchi ; le résultat dépend alors fortement du coefficient de réflexion du sol et de la position de l'antenne.

Si l'on est au-delà de l'horizon et relativement près du sol, l'influence de la hauteur est beaucoup plus faible. En effet, dans ce cas, il existe au-dessus du sol une certaine **hauteur critique** jusqu'à laquelle le champ ne varie pratiquement pas. Cette hauteur, qui dépend de la longueur d'onde, de la polarisation et de la nature du sol, est indiquée sur la figure 12. On voit que, en polarisation verticale sur sol très humide, cette hauteur critique est à peu près égale à la longueur d'onde mais qu'elle est plus faible dans les autres cas. Au-dessus, le champ croît linéairement avec la hauteur jusqu'à une deuxième hauteur critique qui ne dépend que de la longueur d'onde et au-dessus de laquelle l'augmentation du champ est beaucoup plus rapide. Si le terrain est très accidenté ou boisé, l'utilisation de ces courbes doit être faite avec précaution.

Pour le service mobile (radiotéléphone), la détermination des zones de couverture d'une station de base est plus aisée que pour la radiodiffusion, car on ne s'intéresse qu'aux voies de communications, mais le principe en est le même. Des véhicules laboratoires circulent sur des routes autour de l'émetteur et enregistrent les valeurs du champ tous les n mètres. L'antenne de mesure est placée dans les conditions les plus représentatives de la réalité, à environ 1,5 m du sol et dans la polarisation de l'antenne d'émission. Son facteur d'antenne est mesuré globalement en tenant compte de la masse du véhicule sur lequel elle est installée.

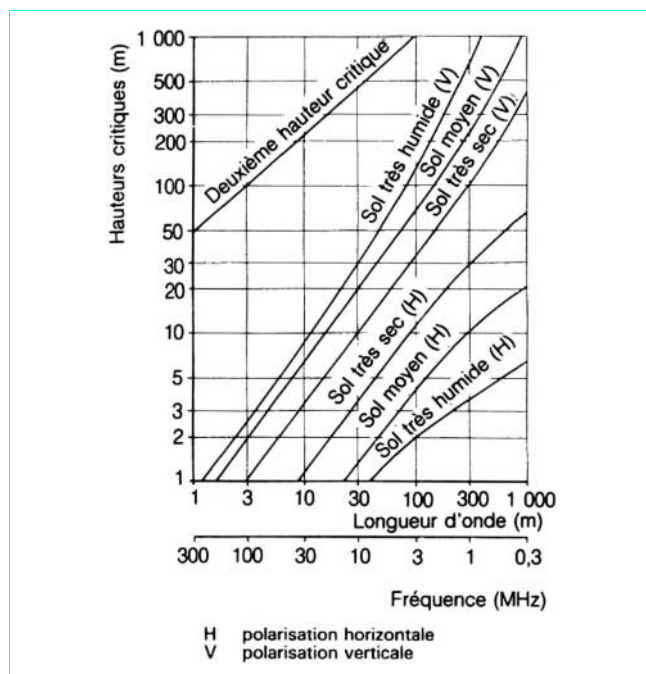


Figure 12 – Hauteurs critiques au-dessus du sol

On présente alors les résultats sous forme de courbes de niveaux isochamp (figure 13) qui permettent de déterminer la zone de couverture de la station (zones où le champ est supérieur ou égal à une valeur donnée).

Ces mesures permettent également l'étude des trajets multiples (figure 14), qui sont un paramètre important à prendre en compte lors de la définition d'un système radioélectrique numérique à large bande.

6.2 Mesure d'environnement radioélectrique

Avant d'installer des équipements radioélectriques (en particulier, des récepteurs) ou des systèmes électroniques sensibles aux champs radiofréquences de forte amplitude (par exemple, des systèmes informatiques ou de contrôle de processus industriels), il peut être nécessaire de faire une analyse préalable de l'environnement radioélectrique sur le site envisagé, afin de localiser les émissions radioélectriques pouvant brouiller la réception ou perturber le fonctionnement des systèmes sensibles.

Pour faire cette analyse, il faut pouvoir évaluer pratiquement tous les champs captés sur le site et donc analyser le spectre radioélectrique sur la plus large gamme de fréquences, au moins de 150 kHz à 18 GHz. Cela implique de disposer d'un équipement complet comprenant des récepteurs de mesure ou analyseurs de spectres, de multiples antennes couvrant la gamme de fréquences désirée et éventuellement d'un ordinateur pour piloter l'ensemble de mesure.

Ce type de mesure s'avère également très utile pour établir des corrélations entre l'apparition de défauts sur des systèmes déjà installés et certaines émissions radioélectriques non permanentes [radars, CB (*Citizen Band*), émetteurs-récepteurs portatifs] dans les environs du site considéré. La figure 15 représente un relevé de mesure de champ sur un site informatique à Metz.

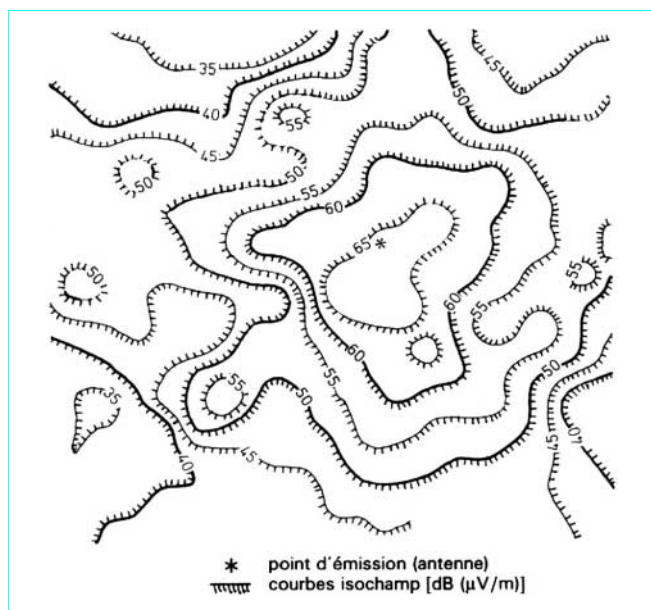


Figure 13 – Courbes iso champ pour l'étude des zones de couverture (doc. CNET)

6.3 Mesure du rayonnement parasite d'équipements non destinés à rayonner de l'énergie radioélectrique

6.3.1 Réglementation des rayonnements parasites

Depuis les années 30, la protection de la réception radioélectrique et en particulier de la radiodiffusion contre les *parasites industriels* a été un des soucis majeurs des administrations chargées de la gestion du spectre radioélectrique en France et à l'étranger. Le CISPR, dépendant de la CEI, a été créé en 1934. Sa vocation est d'établir des Recommandations concernant les méthodes de mesure des signaux parasites créés par différentes catégories d'appareils électriques et électroniques, ainsi que les valeurs limites admissibles des champs perturbateurs. Ces Recommandations sont reprises sous forme de normes dans de nombreux pays pour les équipements civils.

Par ailleurs, les administrations militaires ont publié des normes de compatibilité électromagnétique depuis plusieurs décennies. Les premières normes du genre, les normes militaires américaines MIL-STD-461 et 462 prévoient tout un ensemble de méthodes de mesure et de valeurs limites.

Mais, par leur vocation, les normes militaires et les Recommandations du CISPR diffèrent en bien des points. Le tableau 3 montre les différences essentielles entre ces deux méthodes de mesure de champ, ces différences limitant les possibilités de comparaison entre les méthodes de mesure.

6.3.2 Caractéristiques particulières des mesures de rayonnement parasites

On doit noter les difficultés particulières que l'on rencontre dans la mesure des rayonnements parasites. Bien que le principe de la mesure soit simple, aucune méthode ne donne des résultats parfaitement précis, reproductibles, et représentant réellement le potentiel de brouillage d'un équipement donné. Néanmoins, au

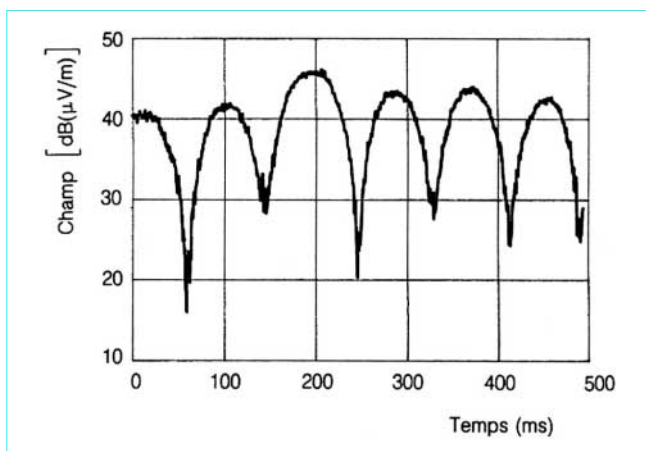


Figure 14 – Enregistrement montrant l'existence de trajets multiples (doc. CNET)

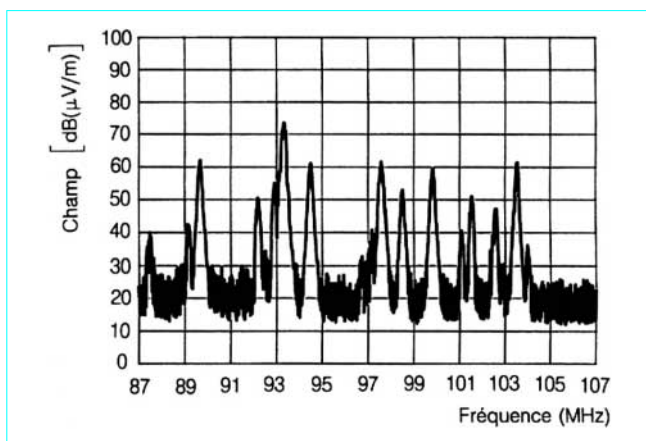


Figure 15 – Mesure de champ sur un site informatique à Metz : bande de fréquence de la radiodiffusion en modulation de fréquence (doc. CNET)

cours des dix dernières années (1978-1988), des efforts considérables ont été mis en œuvre pour améliorer la qualité des mesures.

Les difficultés de la mesure des champs parasites peuvent s'expliquer par les considérations suivantes.

■ **Le matériel en essai n'est pas conçu pour rayonner**, son rayonnement provient donc de ses défauts :

- fuites électromagnétiques des structures ;
- circuits imprimés jouant le rôle d'antennes d'émission non intentionnelles ;
- défaut de blindage de câbles.

Par conséquent, dès lors que la structure rayonnante n'est pas clairement définie, il est très difficile d'assurer une reproductibilité parfaite et systématique sur une série d'un équipement donné. Les câblages interne et externe jouent parfois un rôle fondamental sur les caractéristiques de rayonnement.

■ **L'appareillage de mesure doit être étalonné**, avec précision, sur une très large bande de fréquences, et ne doit pas être sensible à l'environnement. Actuellement, les constructeurs ont encore des difficultés à réaliser des appareils de mesure dont la précision en amplitude est meilleure que ± 1 dB entre 30 et 1 000 MHz.

Tableau 3 – Comparaison des méthodes de mesure de champ en cage de Faraday et sur site en champ libre

Caractéristiques	Norme militaire française	Recommandation du CISPR [2] [3]
Site d'essai	Cage de Faraday	Champ libre - site dégagé
Distance de mesure	1 m	3 ou 10 ou 30 m
Mode de détection (parasites large bande)	Crête	Quasi-crête
Antennes	Large bande	De préférence accordées, éventuellement large bande
Appareil de mesure de champ	Récepteur accordé ou analyseur de spectre	Récepteur accordé (de préférence à l'analyseur de spectre)
Configuration de l'appareil en essai	Configuration fixe et décrite dans la norme	Configuration ajustée pour obtenir le rayonnement maximal par rotation de l'appareil
Position de l'antenne	À une hauteur fixe décrite dans la norme	Détermination de la hauteur de l'antenne à chaque fréquence, pour obtenir le rayonnement maximal
Polarisation de l'antenne	Horizontale et verticale	Horizontale et verticale

Les antennes, en particulier, représentent un des points les plus critiques car le facteur d'antenne va beaucoup dépendre de leur environnement immédiat (cage de Faraday, site en champ libre ou chambre anéchoïque). Les constructeurs d'antennes ne précisent pas toujours leurs conditions d'étalonnage et se contentent de donner une courbe typique de facteur d'antenne. Cela peut se traduire par des écarts de plusieurs décibels sur le résultat de la mesure.

■ **L'emplacement de mesure par lui-même a également une importance considérable.** On doit distinguer la mesure sur site en champ libre et la mesure en cage de Faraday.

- La mesure sur un site en champ libre se fait sur une distance en général de 3 ou 10 ou 30 m. Bien que préférable aux autres, elle nécessite cependant quelques précautions :

- la mesure peut être affectée par du bruit environnant, par exemple les parasites de voitures, ou par des émissions radioélectriques diverses telles que la radiodiffusion, le radiotéléphone, les services radioélectriques privés, dont le spectre radioélectrique s'étend entre 30 et 1 000 MHz ;

- on doit tenir compte de l'*atténuation du site* entre l'appareil à mesurer et le récepteur de mesure.

Nota : l'*atténuation du site* correspond approximativement à l'*affaiblissement de transmission* défini par le CCIR (Recommandation 341-2) [6] [7] [8] [9] [10] et par le Vocabulaire Électrotechnique International (chapitre 705, en préparation). Cependant, dans le cas présent, les distances considérées sont beaucoup plus courtes.

L'*atténuation du site* est le rapport de la puissance fournie à une antenne d'émission de référence (en général un doublet) à la puissance reçue par une impédance de charge adaptée connectée à une antenne de réception de référence (de préférence identique à l'antenne d'émission), les deux antennes étant placées respectivement aux points où seront installés l'appareil à mesurer et l'antenne de mesure.

- La mesure en cage de Faraday n'est pas soumise à la pollution radioélectrique. Cependant, elle a d'autres limitations dont il faut tenir compte :

- au-dessous de 100 MHz, on peut considérer qu'à 1 m de la source, le rayonnement est un rayonnement de champ proche, et il n'est pas possible d'établir une corrélation simple entre les mesures à 1 m et les mesures à 10 ou 30 m ;

- il y a couplage de l'antenne de mesure avec la structure de l'équipement en essai ainsi qu'avec les parois de la cage, surtout pour les équipements de grandes dimensions ; en particulier, il peut y avoir des phénomènes de réflexions multiples ou de résonance de la cage, et parfois même, le résultat de la mesure peut dépendre de l'emplacement du couple antenne de mesure-appareil en essai par rapport aux parois de la cage ; les matériaux absorbants que l'on peut installer sur les parois sont inefficaces au-dessous de 100 MHz, à moins qu'ils aient une épaisseur très grande, ce qui limite le volume disponible de la cage.

Les mesures du rayonnement parasite des équipements non destinés à rayonner sont donc particulièrement délicates et doivent généralement être effectuées par des spécialistes, en particulier pour la vérification de la conformité à des normes, cela malgré la commercialisation par des sociétés spécialisées de logiciels de mesure des perturbations radioélectriques qui, théoriquement, devraient permettre à des non-spécialistes de réaliser ce type de mesures.

6.4 Application pratique

Supposons qu'on ait une source de rayonnement à caractériser à une certaine fréquence f et à une distance d de cette source. Il faut d'abord choisir le matériel convenant au type particulier de mesure :

- analyseur de spectre ou récepteur de mesure ;
- type d'antenne avec son étalonnage à la fréquence considérée ;
- câble ayant des pertes suffisamment faibles à la fréquence considérée.

Après avoir installé et réglé l'appareillage de mesure conformément à la procédure choisie, on ajuste la polarisation et la hauteur de l'antenne de façon à obtenir un niveau maximal sur l'appareil de mesure.

Si le niveau maximal est indiqué sous la forme d'une tension V exprimée en dB(μV), le champ E en dB(μV/m), les pertes L en dB et le facteur d'antenne K en dB, la valeur du champ sera égale à (§ 5.1) :

$$E = K + L + V$$

Si le niveau maximal est indiqué sous la forme d'une puissance P exprimée en dBm, la conversion en champ devra passer au préalable par la transformation de la puissance en tension. Si l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure est de 50 Ω, la relation liant la puissance exprimée en dBm à la tension en dB(μV) est la suivante :

$$V = P + 107$$

Par conséquent :

$$E = K + L + P + 107$$

Si le facteur d'antenne n'est pas connu mais seulement le gain G , la relation permettant de passer du gain au facteur d'antenne sous forme logarithmique se déduit des relations indiquées au paragraphe 5.1 où l'on remplace la directivité par le gain isotrope (en supposant que l'impédance d'entrée du récepteur est de 50 Ω) :

$$K = 20 \lg f - G - 29,8$$

où K est exprimé en dB(m⁻¹), G en (dB) et f en (MHz).

Les différentes relations précédentes permettent d'obtenir la valeur du champ en dB($\mu\text{V}/\text{m}$) en fonction des paramètres effectivement connus.

Exemple : supposons qu'on utilise à 100 MHz un système de mesure adapté à 50 Ω , une antenne de 0 dB de gain, que les pertes dans le câble de liaison soient de 4 dB, et que le niveau reçu soit de -50 dBm à cette fréquence, la valeur du champ électromagnétique sera alors de :

$$E = 10,2 + 4 - 50 + 107 = 71,2 \text{ dB}(\mu\text{V}/\text{m})$$

sachant que $K = 20 \lg 100 - 29,8 = 10,2 \text{ dB}(\text{m}^{-1})$.

Si l'on veut exprimer le champ en $\mu\text{V}/\text{m}$, il suffit alors d'effectuer la conversion classique :

$$e = 10^{(E/20)} = 10^{3,56} = 3\,631 \mu\text{V}/\text{m} = 3,6 \text{ mV}/\text{m}$$

Mesures de champ électromagnétique

par **Lucien BOITHIAS**

Ancien Élève de l'École Polytechnique
Ingénieur Général des Télécommunications au Centre National d'Études
des Télécommunications (CNET)

et **Alain AZOULAY**

Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité (ESE)
Chargé du Département Compatibilité électromagnétique au Centre National d'Études
des Télécommunications (CNET) – Centre Paris-B

Références bibliographiques

- [1] BOITHIAS (L.). – *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre*. Dunod – Collection technique et scientifique des télécommunications (1984).
- [2] CISPR Publication 16. *Spécifications du CISPR pour les appareils et les méthodes de mesure des perturbations radioélectriques*. CEI Bureau Central Genève (Suisse).
- [3] CISPR Publication 22. *Limites et méthodes de mesure des caractéristiques des appareils de traitement de l'information relatives aux perturbations radioélectriques*. CEI Bureau Central Genève (Suisse) (1985).
- [4] MA (M.T.) et coll. – *A review of electromagnetic compatibility/interference measurement methodologies*. Proceedings of the IEEE, vol. 73, n° 3, mars 1985.
- [5] *Propagation dans les milieux non ionisés*. CCIR, vol. 5
- [6] Rapport 227-3. *Méthodes générales de mesure de champ et de certaines grandeurs qui s'y rapportent*. Dans [5].
- [7] Rapport 228. *Mesures du champ pour les services de radiodiffusion*. Dans [5].
- [8] Recommandation 341-2. *Notion d'affaiblissement de transmission pour les liaisons radioélectriques*. Dans [5].
- [9] Recommandation 370. *Courbes de propagation sur ondes métriques et décimétriques dans la gamme des fréquences comprises entre 30 et 1 000 MHz. Service de radiodiffusion*. Dans [5].
- [10] Rapport 567. *Méthodes et statistiques permettant la prévision du champ pour les services mobiles terrestres fonctionnant dans les bandes de fréquences comprises entre 30 et 1 000 MHz*. Dans [5].

Normalisation

Normalisation

CEI	625-1	1979	Système d'interface pour instruments de mesurage programmables (bits parallèles, octets série). – 1 ^{re} partie : Spécifications fonctionnelles, spécifications électriques, spécifications mécaniques, applications du système et règles pour le constructeur et l'utilisateur (NF C 42-910).	MIL STD 461	1967	Electromagnetic interference characteristics requirements for equipment.
				MIL STD 461 A	1967	Electromagnetic interference characteristics requirements.
				MIL STD 462	1967	Measurement of Electromagnetic interference characteristics.
CEI	625-2	1980	Système d'interface pour instruments de mesurage programmables (bits parallèles, octets série). – 2 ^e partie : Convention de code et de format (NF C 42-911).			