



MESURES DU RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE NON IONISANT

1^{re} partie: Gamme de fréquences de 100 kHz à 300 GHz

Rapport du groupe de travail "Mesures du rayonnement
électromagnétique non ionisant dans l'environnement"

**Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)
Berne, mai 1992**

Commande: Service de documentation
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
3003 Berne

Table des matières

	Page
1 Introduction	1
2 Concepts et définitions	4
3 Valeurs limites d'immissions	8
4 Recommandations pour les mesures	11
4.1 Généralités	11
4.2 Renseignements sur la source et la zone à examiner	14
4.3 Grandeurs examinées	14
4.4 Estimation de l'intensité de champ	19
4.5 Appréciation de la nécessité des mesures	20
4.6 Mesures indicatives	20
4.7 Emplacement et durée des mesures	21
4.8 Equipement de mesure	22
4.9 Etalonnage	24
4.10 Réalisation des mesures	25
4.11 Incertitude des mesures	26
4.12 Evaluation et appréciation	32
Zusammenfassung	35
Résumé	35
Riassunto	36
Abstract	36
Appendice 1: Listes de contrôle pour la planification et la réalisation des mesures	37
Appendice 2: Mesures d'immissions des installations de radar	40
Bibliographie	44

1 Introduction

La prolifération d'appareils électriques et leur utilisation de plus en plus large ont sensiblement modifié l'environnement électromagnétique de l'homme. En comparaison avec les champs électriques et magnétiques naturels qui ont existé de tout temps, l'intensité des champs créés par l'homme dans son environnement, dans les lieux d'habitation et sur le lieu de travail, a fortement augmenté en l'espace de quelques décennies. De plus, l'on tend toujours à exploiter de nouvelles fréquences.

La Loi sur la protection de l'environnement (LPE), entrée en vigueur le 1^{er} janvier 1985, définit notamment que le rayonnement électromagnétique non ionisant est un effet qui doit être limité, afin qu'il ne devienne pas nuisible ni incommodant pour l'environnement. Pour évaluer les atteintes nuisibles ou incommodantes des valeurs limites d'immissions sont applicables. Pour définir les bases scientifiques nécessaires à la fixation de ces valeurs limites, l'OFEFP a mis sur pied en 1989 le groupe de travail "effets du rayonnement électromagnétique non ionisant sur l'environnement", comprenant des médecins, de toxicologues et des biologistes. Au cours d'une première phase ce groupe de travail a évalué et examiné les connaissances scientifiques sur la réaction d'organismes biologiques au rayonnement électromagnétique non ionisant dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 300 GHz (OFEFP 1990). Il remettra prochainement ses conclusions pour la gamme de fréquences inférieures à 100 kHz.

Pour que les immissions du rayonnement électromagnétique non ionisant dans l'environnement puissent être comparées avec des valeurs limites d'immissions, on doit pouvoir les mesurer avec une précision suffisante et de façon représentative. De ce fait, l'OFEFP a mis sur pied un autre groupe de travail, composé de spécialistes qui ont été chargés du mandat suivant:

Le groupe de travail élabore une recommandation indiquant comment les champs électriques et magnétiques dans l'environnement doivent être mesurés, compte tenu de l'état actuel de la technique. Les mesures doivent porter sur la gamme de fréquences de 0 - 300 GHz, l'accent étant mis toutefois sur les bandes de fréquences les plus utilisées.

Le groupe de travail a considéré qu'il était judicieux, pour traiter ce mandat, de séparer les hautes fréquences des basses fréquences. La séparation entre ces gammes est située à la fréquence de 100 kHz, bien qu'une limite très nette entre ces deux gammes soit arbitraire et qu'un certain chevauchement dans la zone limite soit inévitable. Le présent rapport contient ainsi une recommandation pour les mesures s'appliquant aux hautes fréquences situées entre 100 kHz et 300 GHz.

Le groupe de travail considère qu'il n'est pas indiqué de remettre des instructions par trop détaillées, étant donné que, d'une part, la technique de mesure est en pleine évolution et que, d'autre part, la quasi-totalité des situations de mesure représente des cas individuels, qui impliquent une solution adaptée au problème. C'est pourquoi la présente recommandation tente de formuler des principes applicables de manière générale et des exigences minimales, afin qu'une manière de procéder uniforme dans ses bases soit garantie pour les futures mesures. La conception concrète des mesures dépend du problème à résoudre et doit par conséquent être laissée au choix de la personne effectuant les mesures. Le présent document constitue donc une recommandation adressée aux spécialistes qui sont familiarisés avec cette matière.

Selon les expériences actuelles, les valeurs limites d'immissions proposées (OFEFP 1990) ne sont atteintes ou dépassées qu'à proximité immédiate des sources de rayonnement. Pour cette raison, le groupe de travail a prêté une attention particulière aux mesures proches de ces sources.

Ce groupe de travail se compose comme suit:

Présidence:

A. Stettler Docteur ès sciences, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

Membres:

G. Amann-Jennson Int. Arbeitskreis für biologische Elektrotechnik, Rheineck

A. Egloff Direction générale des CFF

U. Feller Docteur en physique, Office fédéral de métrologie

F. Gardiol Professeur, Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, EPFL, Lausanne

H. Jossen CNA Lucerne

E. Joye Inspection fédérale des installations à courant fort, Lausanne

Ch. Patry Groupement de l'armement

Y. Rollier SA de l'Energie de l'Ouest Suisse, Lausanne

J. Siegenthaler Direction générale des PTT

Secrétariat:

J. Baumann Docteur ès sciences, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage

2 Concepts et définitions

Sont définies et expliquées ci-après en ordre alphabétique, les expressions utilisées dans le présent rapport. Pour plus de détail au sujet de ces expressions, on consultera les ouvrages spécifiques de l'électrotechnique.

Champ lointain: espace dans lequel le champ électromagnétique se propage sous forme d'onde plane. Les vecteurs de champs électriques et magnétiques sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la direction de propagation. Ils ne présentent pas de déphasage et leurs sommes se situent dans un rapport constant:

$$E/H = 377 \text{ ohms}$$

Pour les mesures dans la pratique, on peut admettre que la relation précitée, au delà de quelques longueurs d'ondes de la source, est satisfaite dans une bonne approximation. Dans ces conditions, il suffit de mesurer soit l'intensité de champ électrique ou magnétique, soit la densité de puissance.

Champ proche: zone spatiale à proximité de la source de rayonnement, dans laquelle on rencontre des conditions de champ plus complexes que dans le champ lointain. Le champ proche réactif, appelé aussi champ d'induction, s'étend de la source jusqu'à une distance de quelques longueurs d'onde. Selon les directives australiennes de mesures (Australie 1988), la composante réactive, à 3 longueurs d'onde d'un dipôle idéal, ne contribue plus qu'à raison de 10 % à l'intensité de champ. Cet écart peut être considéré comme règle globale pour l'étendue du champ proche réactif. Dans le champ proche réactif, le champ électrique et le champ magnétique sont indépendants, et on les mesure séparément. A partir de quelques longueurs d'ondes de la source, il suffit en revanche de mesurer soit l'intensité de champ électrique ou magnétique, soit la densité de puissance.

Densité de puissance S (W/m²): puissance de rayonnement d'une onde électromagnétique qui traverse une surface perpendiculaire à la direction de propagation. En l'absence d'autres précisions, il s'agit toujours dans le présent document de la valeur moyenne temporelle de la densité de puissance. Dans le champ lointain, on a les rapports suivants:

$$S = E \cdot H$$

$$S = E^2/377 = 377 \cdot H^2,$$

où E et H constituent les valeurs efficaces des intensités de champs électrique (V/m) et magnétique (A/m).

Autres désignations: densité surfacique de puissance (DIN/VDE 1982); densité surfacique d'énergie (IRPA 1985).

Densité de puissance équivalente S_E; S_H (W/m²): la notion de densité de puissance équivalente (NCRP 1981) n'a de signification que dans le champ proche (dans le champ lointain, la densité de puissance coïncide effectivement avec la densité de puissance équivalente). Dans le champ proche, il serait nécessaire, pour déterminer la densité de puissance, de former le produit vectoriel de l'intensité de champ électrique et magnétique et d'en calculer la moyenne temporelle. Il faut pour cela que les deux grandeurs de champs puissent être mesurées d'après leurs amplitude, leur direction et leur phase, ce qui soulève actuellement encore de grandes difficultés. Pour simplifier, on traitera ci-après un champ proche comme un champ lointain et on calculera la densité de puissance équivalente comme suit:

$$S_E = E^2/377$$

$$S_H = 377 \cdot H^2,$$

où E et H représentent les valeurs efficaces des intensités de champs électrique (V/m) et magnétique (A/m).

Etant donné que les champs électriques et magnétiques dans le champ proche ne sont pas liés par l'impédance de 377 ohms, en règle générale les densités de puissance équivalentes S_E et S_H sont différentes. Est déterminante pour l'appréciation d'une im-

mission la valeur la plus élevée des deux; cette valeur sera toujours semblable ou supérieure à la densité effective de puissance.

Désignation en anglais: Plane wave equivalent power density.

Densité de puissance impulsionnelle S_p (W/m^2): valeur moyenne de la densité de puissance pendant la durée d'impulsion (n'est représentative que pour les signaux pulsés).

Immissions, valeurs limites d'immissions: selon l'article 7 de la loi fédérale sur la protection de l'environnement, les atteintes (le rayonnement électromagnétique non ionisant en fait également partie) sont dénommées émissions au sortir des installations et immissions au lieu de leur effet. Les valeurs limites d'immissions (VLI) indiquent les valeurs que ces immissions ne doivent pas dépasser pendant une durée d'appréciation déterminée.

Désignation en anglais de la valeur limite d'immission: exposure limit.

Intensité de champ électrique E (V/m): dans le présent rapport, E signifie partout la valeur efficace de la somme vectorielle du champ électrique,

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

où E_x , E_y , E_z désignent les valeurs efficaces de l'intensité de champ électrique dans les directions orthogonales de l'espace x, y, z.

Intensité de champ magnétique H (A/m): dans ce document, H signifie partout la valeur efficace de la somme vectorielle du champ magnétique,

$$H = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} ,$$

où H_x , H_y , H_z désignent les valeurs efficaces de l'intensité de champ magnétique dans les directions orthogonales de l'espace x, y, z.

Intensité de champ non perturbé: intensité de champ électrique ou magnétique en l'absence de personnes ou d'objets pouvant perturber le champ. Les valeurs limites d'immissions (chapitre 3) se réfèrent aux intensités de champ non perturbé.

Source secondaire: objet métallique ou non métallique qui absorbe une partie d'un champ de rayonnement et la rayonne à nouveau. En l'occurrence, on peut constater, en particulier à proximité des objets métalliques résonnants, une concentration locale et un accroissement très marqués des intensités de champs (Tell 1989). De tels champs ont le caractère de champs proches et n'ont d'importance en règle générale qu'à proximité immédiate d'une source de rayonnement.

Taux d'absorption spécifique TAS (W/kg): quantité de puissance de rayonnement qui est absorbée par un organisme, par kg de poids corporel. Le TAS est une grandeur dosimétrique fondamentale permettant de décrire les effets du rayonnement électromagnétique à haute fréquence sur un organisme vivant. Il est proportionnel à la densité de puissance et dépend notamment de la grandeur du corps absorbant, de la fréquence et de la nature du tissu exposé. Le TAS ne pouvant pas être mesuré dans la pratique, les valeurs limites d'immissions ont été fixées pour l'intensité de champ électrique et magnétique et la densité de puissance équivalente en l'absence de personnes ou d'objets.

3 Valeurs limites d'immissions

Le groupe de travail "effets du rayonnement électromagnétique non ionisant sur l'environnement", mis sur pied par l'OFEFP, a également publié, avec une appréciation des résultats d'essais scientifiques, des recommandations pour les valeurs limites d'immissions (OFEFP 1990). Ces valeurs sont applicables à toute la population, mais ne régissent pas les expositions sur le lieu de travail et lors de traitements médicaux.

En cas d'exposition du corps entier, la valeur efficace de l'intensité de champ non perturbé et la densité de puissance équivalente ne doivent pas dépasser la valeur limite indiquée dans le tableau 1. La figure 1 donne une représentation graphique des valeurs limites. Pour les fréquences supérieures à 10 MHz, ces valeurs limites s'appliquent respectivement à la densité de puissance moyenne calculée pour une durée de 6 minutes ou à la racine de la moyenne sur 6 minutes de l'intensité de champ élevée au carré.

De plus, dans le cas d'un rayonnement pulsé, les valeurs de crête de la densité de puissance (c'est-à-dire sa moyenne pour la durée de l'impulsion) et de l'intensité de champ ne doivent pas dépasser des valeurs respectivement 1000 fois et 32 fois supérieures aux limites indiquées dans le tableau 1.

Fréquence f (MHz)	Intensité de champ électrique E (V/m)	Intensité de champ magnétique H (A/m)	Densité de puis- sance équivalente S (W/m ²)
0.1-1	87	$0.23/\sqrt{f}$	---1)
1-10	$87/\sqrt{f}$	$0.23/\sqrt{f}$	---1)
10-400	27.5	0.073	2
400-2000	$1.375\sqrt{f}$	$0.0037\sqrt{f}$	$f/200$
2000-300000	61	0.16	10

Tableau 1: Valeurs limites d'immissions pour les intensités de champ et les densités de puissance du rayonnement électromagnétique non ionisant (IRPA 1988).
Fréquence f en MHz.

1) En dessous de 10 MHz, les effets indirects (tensions de contact ou perturbations des stimulateurs cardiaques) sont déterminants pour la grandeur des valeurs limites. Vu que ces effets dépendent directement de l'intensité de champ, on renonce à indiquer la densité de puissance équivalente.

En présence de plusieurs fréquences simultanées, on procédera comme suit:

- Si l'une des fréquences au moins est supérieure à 10 MHz, la valeur limite est respectée lorsqu'aucune des sommes suivantes (moyenne calculée durant 6 minutes) n'est supérieure à 1:

$$\sum_i (E_i/E_{Gi})^2 ; \quad \sum_i (H_i/H_{Gi})^2 ; \quad \sum_i S_i/S_{Gi} . \quad (3.1)$$

- Si toutes les fréquences en présence sont inférieures à 10 MHz, la valeur limite est respectée lorsqu'aucune des sommes ci-après ne dépasse 1:

$$\sum_i E_i/E_{Gi} ; \quad \sum_i H_i/H_{Gi} . \quad (3.2)$$

Où "i" indique la fréquence i et "Gi" la valeur limite qui lui est attribuée, selon tableau 1.

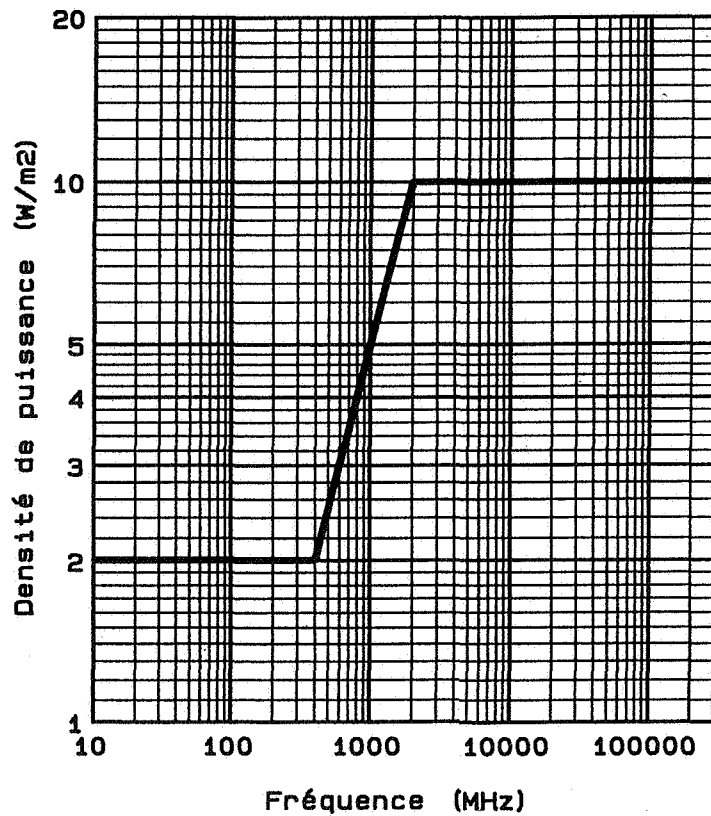
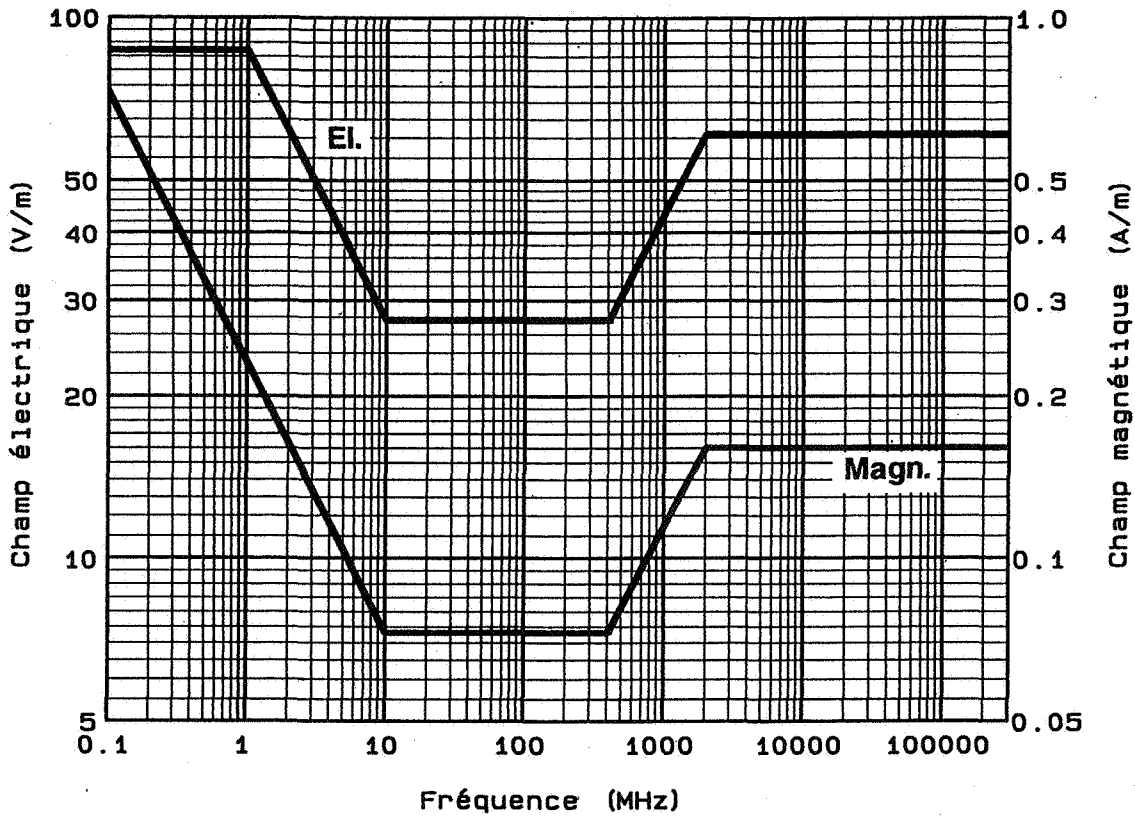


Figure 1: Valeurs limites d'immissions pour les intensités de champ et la densité de puissance du rayonnement électromagnétique non ionisant (IRPA 1988)

4 Recommandations pour les mesures

4.1 Généralités

L'objectif des contrôles est d'examiner si les valeurs limites d'immissions pour les champs électriques ou magnétiques sont respectées ou dépassées. Un tel examen s'appuie en règle générale sur un énoncé précis du problème dont l'objectif est de définir la zone à examiner, les objets à protéger et la gamme de fréquences. Sont considérés comme objets à protéger, selon la loi sur la protection de l'environnement, l'être humain, les animaux et les plantes, la priorité étant accordée, suite aux expériences faites, à la protection de l'être humain. La zone à examiner peut être définie spécifiquement dès le début (par exemple une chambre définie dans un bâtiment) ou être formulée de manière "ouverte" (par ex. environs d'un émetteur où des personnes peuvent se trouver). Dans le deuxième cas, la zone à contrôler ne peut être circonscrite avec précision qu'en cours d'examen.

D'après les expériences effectuées jusqu'ici, les immissions n'atteignent les valeurs limites qu'à proximité immédiate des sources. En règle générale, l'intensité des immissions diminue avec l'augmentation de l'éloignement de la source. Il importe de mentionner ici déjà que c'est précisément dans le champ proche de la source, c'est-à-dire là où les immissions sont les plus importantes, que les difficultés liées à la technique de mesure et ainsi les incertitudes de mesure sont les plus grandes. Si les examens préalables font apparaître sans équivoque que, dans une zone à examiner déterminée, les immissions se situent nettement en dessous des valeurs limites, il est permis de renoncer aux mesures (voir paragraphe 4.5).

Les immissions peuvent varier considérablement, dans le temps et l'espace. En principe, on devra faire en sorte que les examens soient effectués de manière à enregistrer les valeurs maximales locales et temporelles des immissions. A cet effet, on définira des durées de mesure normalisées, dépendant de la situation.

Comme résultat du contrôle, on obtiendra des grandeurs d'examen qui peuvent être comparées directement avec les valeurs limites d'immissions. Ces grandeurs sont définies différemment selon la fréquence et le type d'immissions (par ex. valeur moyenne des 6 minutes de la densité de puissance; moyenne de la valeur efficace de l'intensité de champ calculée pendant la durée d'impulsion; somme pondérée des intensités de champ élevées au carré lorsqu'il y a plusieurs fréquences); elles sont prescrites dans la définition des valeurs limites d'immissions (chap. 3).

Les présentes recommandations de mesures ne peuvent pas aborder chaque cas particulier en détail. Elles visent plutôt à fixer une procédure générale et uniforme dans les aspects principaux pour le contrôle des immissions. Le grand nombre de sources et de situations de nature différente fait qu'il est indispensable d'adapter chaque fois la méthode d'examen et la technique de mesure au problème à examiner. On peut en conclure dès lors que de tels examens doivent être effectués par un personnel qualifié.

La figure 2 montre le déroulement de la planification, de la réalisation et de l'appréciation d'un tel contrôle, sous forme d'un ordinogramme. Les différentes phases sont expliquées ci-après plus en détail.

Le groupe de travail a étudié une série d'instructions de mesure établies par des organisations étrangères (ANSI 1981, DIN/VDE 1982, Önorm 1986, Seibersdorf 1988, Australie 1988, Tell 1983, Stuchly et al. 1986, 1987, Joyner 1988); comme document de base pour les présentes recommandations, on s'est fondé surtout sur les instructions australiennes (Australie 1988), qui, pour leur part, s'appuient largement sur le document ANSI 1981. Au cours de ses études, le groupe de travail a aussi pris connaissance du projet d'instructions de mesures remaniées de l'ANSI (ANSI 1991).

Pour les mesures du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes les prescriptions pertinentes de l'ASE/CEI (ASE 1983) sont applicables en Suisse.

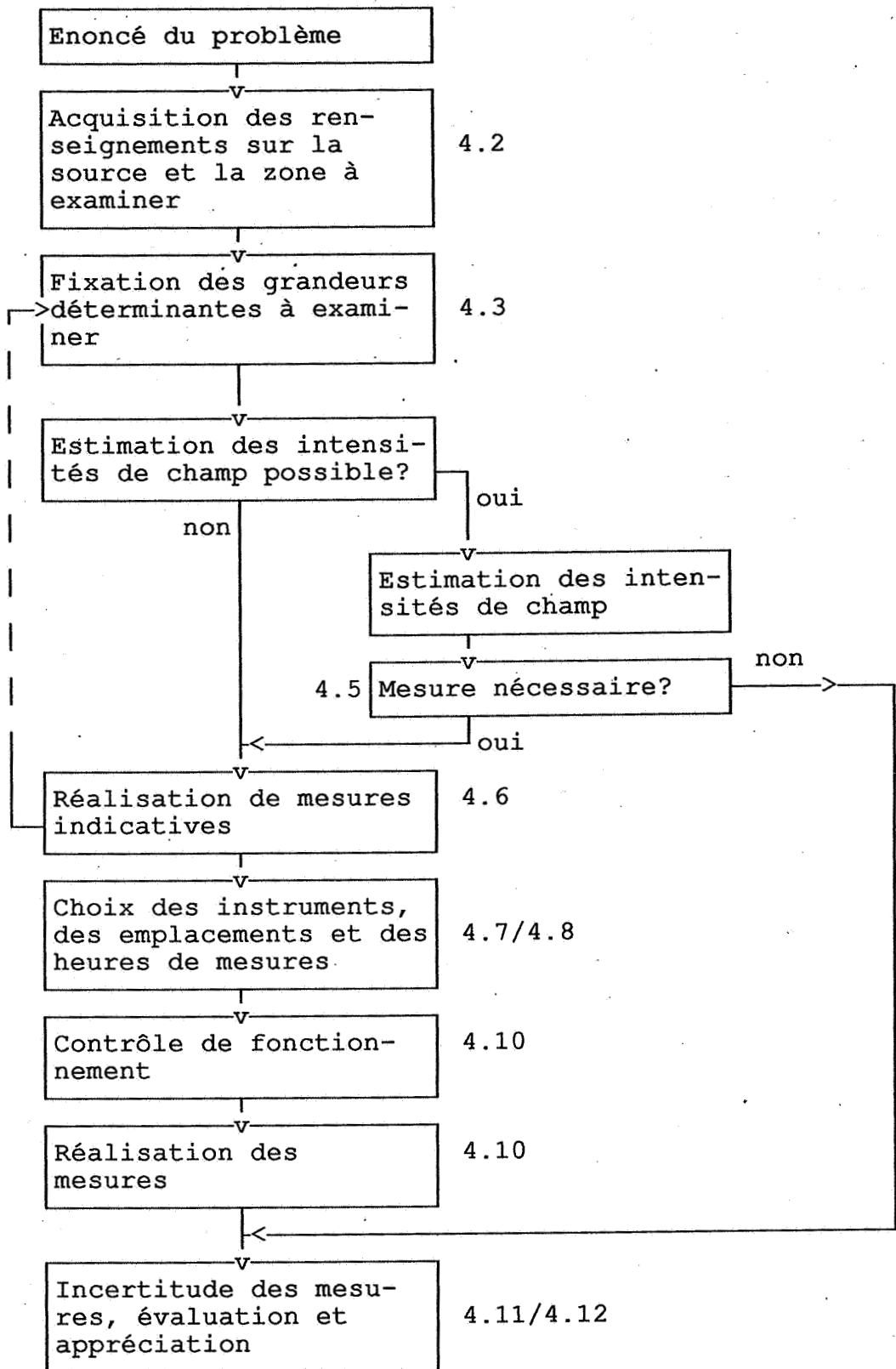


Figure 2: Déroulement des mesures d'immissions des champs électromagnétiques

4.2 Renseignements sur la source et la zone à examiner

Au début de la planification des mesures, il importe d'obtenir les informations suivantes sur la source et la zone à examiner:

- heures d'exploitation,
- fréquence(s) porteuse(s),
- puissance d'émission,
- polarisation,
- genre de modulation,
- largeur d'impulsions, taux de modulation, fréquence de répétition des impulsions (pour les signaux pulsés),
- type d'antenne,
- hauteur de l'antenne au-dessus du sol,
- orientation et rotation de l'antenne,
- diagramme d'antenne, gain d'antenne,
- résultats de mesures de sources comparables,
- autres sources proches de la zone à examiner, susceptibles d'influencer les mesures,
- accessibilité de la zone à examiner pour la population,
- topographie de la zone à examiner,
- objets conducteurs dans la zone à examiner, pouvant agir comme sources secondaires,
- température, humidité, nature du sol (humide, sec, enneigé), végétation.

L'appendice 1 contient une liste de contrôle pouvant servir à la planification des mesures.

4.3 Grandeurs examinées

D'après les renseignements obtenus sur la source, selon 4.2, on peut en règle générale stipuler la grandeur d'examen applicables à la situation à prendre en considération. Si ces indications ne suffisent pas, on peut déterminer les éléments manquants par l'intermédiaire de mesures indicatives (voir 4.6).

La définition des grandeurs d'examen contient trois éléments:

- la grandeur physique à mesurer,
- les prescriptions pour le calcul de la moyenne temporelle,
- les autres opérations éventuelles de calcul (totalisation, pondération).

En outre, on distingue trois types d'immissions:

- permanente: immission continue pendant au moins 6 minutes.
Exemple: signaux de radio ou de télévision
- irrégulière: oscillante durant 6 minutes et/ou d'une durée inférieure à 6 minutes. Exemples: radiocommunications mobiles, sources en déplacement
- pulsée: exemple: radar

Dans ces trois cas, on peut être en présence d'une ou de plusieurs fréquences simultanées.

Selon les directives de l'IRPA (IRPA 1988, voir chapitre 3), l'intensité absorbée par un être humain aux fréquences supérieures à 10 MHz, exprimée par le taux d'absorption spécifique TAS en W/kg de poids corporel, doit par principe être limitée. Comme durée d'appréciation on prescrit 6 minutes, ce qui correspond à la constante thermique de l'être humain. Cette exigence garantit que l'énergie absorbée durant 6 minutes ne dépasse pas une valeur déterminée. Vu que le TAS, à une fréquence donnée, augmente proportionnellement à la densité de puissance, on doit calculer la moyenne temporelle de

- la **densité de puissance** ou de
 - l'**intensité de champ** électrique ou magnétique **élevée au carré**.
- Pour les signaux pulsés, il importe d'examiner simultanément deux grandeurs: la moyenne de la densité de puissance durant 6 minutes et la moyenne pendant la durée de l'impulsion.

Pour les fréquences inférieures à 10 MHz, les valeurs limites d'immissions ne sont plus déterminées en fonction de l'absorption

d'énergie, mais sur la base des effets en relation directe avec l'intensité de champ. Pour cette raison, le tableau 1 n'indique que les valeurs limites d'immissions pour les intensités de champ, et non pas celles qui s'appliquent à la densité de puissance.

L'IRPA recommande, dans sa réponse à une question à ce sujet (IRPA 1990), d'appliquer également dans cette gamme de fréquences une durée d'appréciation de 6 minutes et de calculer la valeur moyenne de l'intensité de champ.

Le tableau 2 fournit une récapitulation des grandeurs d'examen pour le cas où l'immission provenant d'une seule fréquence domine nettement. Ces grandeurs doivent être comparées avec les valeurs limites d'immissions applicables respectivement aux intensités de champ et aux densités de puissance du tableau 1, pour la fréquence considérée.

Si des signaux importants apparaissent simultanément à plusieurs fréquences, les composantes individuelles de toutes les fréquences sont alors groupées en sommes pondérées (voir équations 3.1 et 3.2). Ces sommes ne devraient pas dépasser la valeur de 1. Une récapitulation des grandeurs d'examen pour les cas portant sur plusieurs fréquences se trouve dans le tableau 3.

Fréquence	Type de signal	Durée d'appréciation	Grandeur examinée	
			Densité de puissance	Intensité de champ
> 10 MHz	permanent	6 minutes	<S>	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$ ou <A>
	irrégulier	6 minutes	<S>	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$
	pulsé	{ 6 minutes durée d'im- pulsion	<S> <S>/1000	$\sqrt{\langle A^2 \rangle}$ <A>/32
< 10 MHz	permanent ou irrégulier	6 minutes	---	<A>
	pulsé	{ 6 minutes	---	<A>
		{ durée d'im- pulsion	---	<A>/32

Tableau 2: Grandeurs examinées pour le cas où il y a une seule fréquence. Ces grandeurs doivent être comparées aux valeurs limites d'immissions du tableau 1 respectivement pour la densité de puissance et les intensités de champ.

- S: Densité de puissance équivalente
- A: Valeur efficace de l'intensité de champ électrique et magnétique non perturbé.
- < >: La valeur moyenné des grandeurs entre < > doit être déterminée pendant la durée d'appréciation indiquée.

Fréquence	Type de signal	Durée d'appréciation	Grandeur examinée	
			Densité de puissance	Intensité de champ
Au moins une fréquence > 10 MHz	permanent	6 minutes	$\sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$	$\sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$ ou $\sqrt{\sum_i \langle A_i \rangle^2 / A_{Gi}^2}$
	irrégulier	6 minutes	$\sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi}$	$\sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2}$
	pulsé	$\left\{ \begin{array}{l} 6 \text{ minutes} \\ \text{durée d'impulsion} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi} \\ \frac{1}{1000} \sum_i \langle S_i \rangle / S_{Gi} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2} \\ \frac{1}{32} \sqrt{\sum_i \langle A_i^2 \rangle / A_{Gi}^2} \# \end{array} \right.$
Toutes les fréquences < 10 MHz	permanent ou irrégulier	6 minutes	---	$\sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi}$
	pulsé	$\left\{ \begin{array}{l} 6 \text{ minutes} \\ \text{durée d'impulsion} \end{array} \right.$	---	$\left\{ \begin{array}{l} \sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi} \\ \frac{1}{32} \sum_i \langle A_i \rangle / A_{Gi} \# \end{array} \right.$

Tableau 3: Grandeurs examinées pour le cas où il y a plusieurs fréquences. Ces grandeurs doivent être comparées avec la valeur 1.

- S_i : Densité de puissance équivalente, à la fréquence i .
- S_{Gi} : Valeur limite d'immission pour la densité de puissance équivalente, à la fréquence i , selon tableau 1.
- A_i : Valeur efficace de l'intensité de champ électrique et magnétique non perturbé, à la fréquence i .
- A_{Gi} : Valeur limite d'immission pour l'intensité de champ électrique et magnétique, à la fréquence i , selon tableau 1.
- < >: La valeur moyenne des grandeurs entre < > doit être déterminée pendant la durée d'appréciation indiquée.
- #: La totalisation a lieu pour les fréquences i dont les impulsions peuvent être disponibles simultanément.

4.4 Estimation de l'intensité de champ

Si la zone à contrôler se trouve dans le champ lointain de la source, les intensités de champ peuvent être estimées par calcul. Les limites entre le champ proche et le champ lointain sont indiquées dans le chapitre 2. Pour le calcul, on considère tout d'abord une exploitation normale et la puissance maximale spécifiée de la source. Les données de la source et l'estimation des intensités de champ sont utilisées non seulement pour la planification des mesures, mais aussi pour l'appréciation d'un danger possible auquel est exposé le personnel de mesure travaillant dans le champ.

Dans le champ lointain, la densité de puissance S dans la direction principale de rayonnement, selon

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

peut être estimée avec une incertitude d'environ ± 5 dB,

où

- S: Densité de puissance (W/m^2)
- P: Puissance d'émission (W)
- G: Gain d'antenne (par rapport à une source isotrope)
- d: Distance de l'antenne (m).

Les intensités de champ résultent de

$$E = \sqrt{377 \cdot S} \quad (V/m) ,$$

$$H = \sqrt{S/377} \quad (A/m) .$$

Le champ proche d'une source est en général d'une telle complexité que l'estimation des intensités de champ à un pareil emplacement ne paraît pas judicieux dans la majorité des cas.

4.5 Appréciation de la nécessité des mesures

Lorsqu'il ressort de l'estimation précitée que la grandeur d'examen pour l'intensité de champ (voir tableaux 2 et 3) est inférieure de plus d'un facteur 10 à la valeur limite d'immission applicable respectivement à l'intensité de champ (tableau 1) et à la valeur 1 pour les sommes dans toute la zone examinée et qu'aucune immission supérieure ne peut se produire en raison de la nature du système, on peut alors renoncer à une mesure. Si l'on utilise comme grandeur d'examen la densité de puissance, on considérera par analogie que la valeur limite d'immission appropriée doit être inférieure d'un facteur 100. De même, on peut se passer de mesure lorsque des résultats mesurés dans une situation en tous points comparable sont déjà disponibles. Avant qu'une telle décision soit prise, on prendra aussi en considération les causes perturbatrices possibles d'une source, par exemple les fuites qui peuvent être à l'origine d'immissions supérieures à la normale. Si ces causes ne peuvent être exclues avec certitude, il faudra procéder à des mesures indicatives.

4.6 Mesures indicatives

Après l'examen des données techniques de la source et l'estimation des intensités de champ à prévoir, il est souhaitable de procéder à des mesures indicatives, dont les objectifs seront les suivants:

- fournir tous les paramètres utilisés pour la fixation définitive de la grandeur d'examen (voir 4.3),
- vérifier et affiner l'estimation de l'intensité de champ,
- définir les heures, les emplacements et les états de fonctionnement de la source où apparaissent les immissions les plus élevées,
- déceler, analyser et supprimer les problèmes de mesure.

4.7 Emplacement et durée des mesures

La zone à examiner comprend en règle générale la région dans laquelle la grandeur d'examen pour l'intensité de champ atteint au moins 10 % et celle de la densité de puissance au moins 1 % de la valeur limite d'immission applicable. Les emplacements de mesure à l'intérieur de la zone à examiner sont répartis de façon à obtenir des renseignements représentatifs des immissions. A cet égard, il s'agit de déterminer avec soin les lieux et les temps de présence des organismes vivants à protéger. Lorsque le champ est hétérogène (par ex. à la suite de réflexions), on enregistrera les maximas locaux des grandeurs d'examen. On attachera une attention spéciale aux sources secondaires potentielles. De plus, il est recommandé de répartir les emplacements de mesure de façon à ce que les résultats puissent être représentés par une carte d'intensités de champ.

Les heures et les durées des mesures, fixées d'après les données de fonctionnement, l'expérience acquise et les résultats des mesures indicatives, doivent être prévues de façon à saisir les maximas temporels des grandeurs d'examen. Si les heures d'immissions maximales ne peuvent pas être déterminées d'avance, on procédera à une mesure continue durant une période prolongée. Dans la mesure où la grandeur d'examen dépend manifestement et uniquement de l'état de fonctionnement de l'installation (par ex. intensité de champ en fonction de la puissance d'émission), il ne sera pas nécessaire d'attendre que l'on enregistre les immissions les plus élevées; dans pareil cas, il suffit de convertir l'intensité de champ mesurée dans un état de fonctionnement déterminé en un état maximal de fonctionnement de l'installation.

4.8 Équipement de mesure

L'équipement de mesure est constitué normalement d'une sonde, d'une ligne de connexion et d'un appareil de mesure.

L'équipement de mesure doit indiquer la valeur efficace de l'intensité du champ électrique ou magnétique ou la densité de puissance équivalente. Dans ce dernier cas, il importe de savoir si la sonde réagit au champ électrique ou au champ magnétique. Il est recommandé de mesurer la valeur efficace réelle (true rms) et, pour les mesures à large bande, il est même indispensable de le faire.

Dans le champ lointain, il suffit de mesurer soit l'intensité du champ électrique, soit l'intensité du champ magnétique ou la densité de puissance. Dans le champ proche, on choisira un équipement permettant de mesurer séparément le champ électrique et le champ magnétique. Cette règle s'applique aussi à la zone proche des sources secondaires.

On veillera à ce que, pour chaque fréquence discrète, les signaux provenant de toutes les directions spatiales et de n'importe quelle polarisation soient pris en compte. Cette exigence est d'une importance particulière dans les champs proches et en présence de réflexions. A cette fin, on recommande l'usage d'instruments de mesure isotropes. Ces instruments mesurent les trois composantes perpendiculaires du vecteur de champ et les additionnent en une valeur efficace d'intensité pour tout le champ, de la manière suivante:

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2},$$

où A_x , A_y et A_z constituent les valeurs efficaces des composantes électriques ou magnétiques du champ dans les directions spatiales x , y et z .

Ainsi, les signaux de toutes les directions spatiales et de chaque polarisation sont mesurés.

Le calcul de la moyenne temporelle pendant la durée d'appréciation (voir tableaux 2 et 3) doit autant que possible être effectué déjà par l'appareil de mesure.

Pour les signaux pulsés, il faut également déterminer la valeur moyenne efficace du champ pendant la durée d'impulsion. Si cette valeur varie dans le temps (par ex. à cause de la rotation de l'antenne), on prendra en compte la valeur maximale. En cas d'utilisation de sondes à large bande à diodes ou thermiques, on veillera spécialement à ce que la sonde ne soit pas saturée par des impulsions courtes mais intensives. Une représentation détaillée des conditions particulières aux mesures des immissions provenant des radars se trouve dans l'appendice 2.

Si l'on est en présence de champs d'intensités importantes à plusieurs fréquences simultanées, on aura recours à des systèmes de mesure capables d'effectuer les sommes contenues dans le tableau 3. Si la valeur limite d'immission est la même pour toutes les fréquences, on peut procéder à une mesure à large bande. Dans pareil cas, on s'assurera que le système de mesure détermine la valeur efficace réelle. Cette condition est satisfaite de par leur construction même, par les sondes thermiques et les sondes à large bande à diodes, pour autant qu'elles sont utilisées dans la plage quadratique de la courbe caractéristique (Tell 1983). Si les valeurs limites d'immissions diffèrent pour les fréquences discrètes, on devra soit procéder à une mesure sélective en fréquence, soit recourir aux sondes à large bande qui effectuent d'emblée une pondération dépendante de la fréquence, en fonction de la courbe de la valeur limite. De telles sondes sont disponibles pour la valeur limite ANSI C 95.1-1982 (Aslan 1983; NARDA) et pour la valeur limite allemande DIN/VDE 084.8, partie 2 (Bossert et al. 1988). Toutefois, les deux courbes de valeur limite précitées se différencient de celle de l'IRPA (IRPA 1988), de sorte que ces sondes à large bande prévues pour la pondération ne peuvent pas être utilisées en règle générale pour la mesure et l'appréciation selon la valeur limite IRPA. Tant qu'aucune sonde avec pondération conforme à la valeur limite IRPA n'est disponible, on procédera à une mesure sélective en fréquence, ce qui exige l'emploi d'analy-

seurs de spectre ou de récepteurs de mesure. Cependant, lorsque l'intensité de champ domine fortement à une fréquence discrète donnée, il est admis de réaliser une mesure à large bande et de renoncer à une pondération avec les valeurs limites. L'erreur systématique qui en résulte dans la grandeur d'examen doit être estimée et prise en compte dans l'appréciation des immissions (4.12).

Les mesures ne doivent pas être perturbées par des signaux situés à l'extérieur de la gamme de fréquences spécifiée de l'instrument de mesure (out of band response).

Les sondes prévues pour le champ électrique doivent être insensibles au champ magnétique et inversement. Cette exigence doit être plus particulièrement respectée pour les mesures dans le champ proche.

La dimension des sondes pour les mesures dans le champ proche doit être inférieure à un quart de la longueur d'onde de la fréquence la plus élevée pour laquelle la sonde est spécifiée (Australie 1988).

L'appareil de mesure et la ligne de connexion doivent être insensibles au rayonnement perturbateur jusqu'au maximum des intensités de champ à prévoir et pour toutes les fréquences, même au-delà de la gamme de fréquences spécifiée. Une liaison par fibre optique entre la sonde et l'appareil de mesure, un blindage approprié de l'appareil et une alimentation indépendante du réseau électrique satisfont par exemple à cette exigence.

4.9 Etalonnage

Pour les mesures, seuls des équipements de mesure étalonnés doivent être utilisés. L'étalonnage doit être effectué par un laboratoire accrédité (Ordonnance sur le système suisse d'accréditation, du 30 octobre 1991).

4.10 Réalisation des mesures

Avant les mesures, un contrôle de fonctionnement doit être effectué sur une source de test connue. Dans toute la mesure du possible, cette source doit présenter les mêmes caractéristiques que les champs à mesurer dans la zone d'examen, en particulier concernant la fréquence, la plage d'intensité de champ et les paramètres de modulation.

L'état de fonctionnement de la source durant les mesures doit être connu.

La sonde, les appareils de mesure, le câble de liaison et les personnes effectuant les mesures peuvent provoquer des distorsions considérables du champ électromagnétique. De ce fait, la disposition et la desserte de l'équipement de mesure doivent être effectuées de façon à réduire le plus possible l'influence sur le résultat de mesure. La sonde peut par exemple être fixée sur un trépied offrant une constante diélectrique faible (par ex. mousse synthétique, bois sec) et être lue à partir d'une distance suffisante.

La sonde doit être suffisamment éloignée des surfaces métalliques, de façon à exclure un couplage direct (capacitif ou inductif; voir aussi le chapitre 4.11). Cet aspect revêt une importance particulière lorsque les intensités de champ doivent être mesurées dans le champ proche d'une source secondaire.

A l'extérieur, les mesures seront effectuées à une hauteur de 1.5 m au-dessus du sol, à moins qu'une hauteur différente ne soit exigée à la suite des examens préalables. A l'intérieur des bâtiments, la hauteur de mesure sera fonction de l'énoncé du problème.

Lors de l'utilisation de sondes isotropes, on contrôlera l'isotropie par rotation de la sonde. La valeur minimale et la valeur maximale mesurées doivent être notées. Ce test simple à effectuer fournit les indications nécessaires sur les différences

du comportement isotropique idéal dans les conditions réelles régnant dans la zone à contrôler.

Lors de l'emploi d'antennes directives, on devra analyser successivement un nombre suffisant de directions spatiales jusqu'à ce que tous les signaux déterminants soient pris en compte. Ce faisant, on veillera à ce que le maximum temporel de la grandeur d'examen soit enregistré pour chaque signal.

La durée de mesure à un emplacement donné est fonction de la grandeur d'examen (tableaux 2 et 3). Lorsque des valeurs moyennes de 6 minutes doivent être déterminées à partir d'immissions stables dans le temps, il est alors admis de mesurer pendant moins de 6 minutes.

Dans le champ proche d'une source, le champ électrique et le champ magnétique doivent être mesurés séparément. Cette règle s'applique aussi à proximité des sources secondaires.

Dans le champ proche et en présence de réflexions, les champs sont en général hétérogènes depuis une fraction de la longueur d'onde jusqu'à plusieurs longueurs d'onde. Pour cette raison, il importe de rechercher les maxima de l'intensité de champ à proximité d'un emplacement donné. Ces maxima pour le champ électrique et le champ magnétique peuvent se trouver à des endroits différents.

L'appendice 1 contient une liste de contrôle pour l'établissement du compte rendu durant les mesures.

4.11 Incertitude des mesures

Toute mesure d'immission présente une marge d'incertitude. Celle-ci doit être estimée pour chaque mesure et être indiquée avec le résultat de la mesure. Lors de l'utilisation de systèmes de mesure isotropes à large bande, les facteurs suivants peuvent contribuer en particulier à l'incertitude de mesure:

- incertitude due à l'intensité de champ pour l'étalonnage,
- réponse en fréquence de la sonde,
- anisotropie de la sonde,
- influences perturbatrices dans la ligne de connexion,
- rayonnement pénétrant dans l'appareil de mesure,
- non-linéarité du système de mesure,
- conditions propres au champ proche,
- effets de la température,
- influence produite sur le champ par les personnes chargées des mesures,
- interaction de la sonde avec des objets métalliques,
- autres facteurs, tels que champs électrostatiques ou rayonnement ionisant.

Ces facteurs sont quantifiés autant que possible ci-après. Le praticien y trouvera en plus quelques conseils lui indiquant comment déceler et éliminer de tels effets, capables de fausser un résultat de mesure.

Incertitude de l'intensité de champ d'étalonnage

Selon les indications concordantes de plusieurs laboratoires étrangers, les intensités de champ, entre 0.1 MHz-35 GHz peuvent être établies en laboratoire avec une incertitude maximale de ± 1 dB ou moins (Kanda et al. 1986, Tofani et Kanda 1989, ANSI 1981, Australie 1988, Bossert et Dinter 1988, Seibersdorf 1988). La plupart des fabricants de systèmes de mesure à large bande indiquent même dans leurs spécifications pour les fréquences individuelles une incertitude maximale de leurs champs d'étalonnage de ± 0.5 dB seulement.

Réponse en fréquence de la sonde

Pour les sondes à large bande isotropes, cette excursion se situe entre ± 0.5 et ± 3 dB, suivant la plage de fréquences. Cette incertitude disparaît lorsqu'on dispose d'un étalonnage effectué exactement à la fréquence mesurée dans l'environnement (cette règle n'est applicable que si le signal d'une fréquence individuelle est dominant).

Anisotropie de la sonde

Les sondes isotropes devraient, dans un cas idéal, indiquer le même résultat de mesure quelle que soit leur direction spatiale. Tout écart par rapport à ce comportement idéal, qui produit un affichage différent suivant l'orientation de la sonde dans un champ homogène, est appelé "anisotropie". Elle est spécifiée par les fabricants et se situe en général entre ± 0.5 et ± 1.5 dB. Pour des sondes fixées à une poignée, l'anisotropie est plus élevée lorsque la poignée est située parallèlement au vecteur du champ électrique. Elle peut aussi être vérifiée dans la zone à examiner, dans la mesure où le champ à l'intérieur du volume occupé par la sonde est homogène.

Influences perturbatrices dans la ligne de connexion

L'influence directe du champ électrique dans les lignes de connexion non optiques peut provoquer un écart pouvant atteindre 10 dB, particulièrement lorsque la ligne est parallèle au vecteur de champ électrique. Les fabricants recommandent dès lors de disposer la ligne de connexion autant que possible orthogonale au vecteur de champ électrique, tant pour l'étalonnage que pour les mesures. Dans les mesures de l'environnement, en particulier dans le champ proche, cependant la direction du vecteur du champ électrique n'est souvent pas connue. Pour des fréquences inférieures à 1 GHz, cette influence peut être décelée et réduite en entourant la ligne de connexion d'anneaux de ferrite. Le problème peut être entièrement éliminé par l'emploi d'une ligne de transmission optique entre la sonde et l'appareil de mesure.

Rayonnement pénétrant dans l'appareil de mesure

Si l'appareil de mesure n'est pas immunisé contre le rayonnement présent dans la zone à examiner, il ne doit pas, en principe, être utilisé. Suivant le cas, on peut reconnaître les problèmes d'interférence en blindant la sonde et la ligne de connexion.

Non-linéarité du système de mesure

A cet égard, on tiendra compte des indications du fabricant sur la plage dynamique étalonnée. Cet aspect est d'une importance particulière pour les mesures des signaux pulsés.

Conditions propres au champ proche

Le chapitre 4.8 exige que les sondes pour champ E soient insensibles au champ magnétique et réciproquement. Bossert et Dinter (1988) recommandent, pour les sondes utilisées dans le champ proche, de vérifier cette exigence dans des champs purement électriques (condensateur à plaques) et magnétiques (bobine de Helmholtz); il faut noter que cette procédure peut être appliquée pour les fréquences inférieures à 100 MHz environ. Si une sensibilité transversale non désirable apparaît à cette occasion, les données d'étalonnage ne sont alors utilisables que sous réserve pour des mesures dans le champ proche. Il faut tenir compte du fait que l'étalonnage s'effectue en règle générale dans un champ homogène, dans des conditions de champ lointain (par ex. dans une cellule TEM). Dans les champs proches, l'impédance (rapport entre l'intensité des champs électrique et magnétique) peut toutefois varier de celle du champ lointain (377 ohms) dans une mesure non prévisible. Ainsi, il est possible que la sensibilité non désirée d'une sonde électrique pour le champ magnétique (ou inversement) falsifie le résultat de mesure. Cette falsification peut être estimée dans la mesure où la sensibilité transversale a été déterminée selon la description faite plus haut et que l'impédance du champ proche à mesurer est connue.

Effets de la température

Les sondes sont en général étalonnées à la température ambiante d'un local. La gamme de températures figurant dans les spécifications garantit uniquement, normalement, que le système de mesure fonctionne dans ladite gamme, mais non pas que les données d'étalonnage soient valables pour toute la gamme. En cas de doute, on demandera au fabricant les coefficients de température. Les différences des résultats de mesure dues à la température peuvent être décelées de deux manières:

- Une source connue est amenée successivement dans des milieux ayant des températures différentes, puis mesurée de façon parfaitement reproductible, à l'aide du système de mesure à tester, après réglage de l'équilibre thermique.
- Le système de mesure à tester est préconditionné à la température entrant en ligne de compte, puis amené rapidement à la source de test qui se trouve à la température du local. La mesure de test doit être effectuée immédiatement, avant que la température du système de mesure ne se rapproche par trop de la température de son nouvel environnement.

Lors de la mesure effectuée dans la zone à examiner, on veillera à ce que le système de mesure se trouve en équilibre thermique avec le milieu ambiant.

Influence produite sur le champ par les personnes chargées des mesures

Les champs électriques en particulier peuvent subir une distorsion due à la proximité des personnes. On désire pourtant mesurer le champ non perturbé. La personne chargée des mesures devrait par conséquent se trouver aussi loin que possible de la sonde, à ne pas modifier le résultat de mesure. Le cas échéant, on procédera à la lecture à l'aide de jumelles. Il est recommandé de monter la sonde sur un trépied non conducteur.

Interaction de la sonde avec des objets métalliques

A proximité immédiate d'objets métalliques, on peut constater une interaction directe (capacitive ou inductive) de la sonde avec des parties métalliques. Pour une sonde occupant un espace de 10 cm, le résultat est faussé de moins de 1 dB, lorsque les écarts minimaux ci-après par rapport aux objets métalliques sont respectés (Australie 1988):

- 10 cm pour les fréquences supérieures à 10 MHz
- 15 cm pour les fréquences entre 3 et 10 MHz
- 25 cm pour les fréquences entre 0.5 et 3 MHz.

Une détermination empirique de l'écart minimal admissible dans un cas particulier (par ex. mouvements de la sonde) n'est souvent pas possible, vu que les objets métalliques ont un effet de source secondaire, à proximité de laquelle l'intensité de champ baisse de toute manière très vite avec la distance.

Autres facteurs

Le rayonnement électromagnétique non ionisant s'observe dans certains cas en même temps que des champs électrostatiques ou des rayons X. On consultera les indications du fabricant sur les influences de ces phénomènes sur la précision de mesure.

Une récapitulation des difficultés et des incertitudes de mesure lors de l'utilisation des systèmes de mesure isotropes à large bande, disponibles dans le commerce, est fournie dans une étude de Glimm et Münter (1989): pour 126 appareils de mesure isotropes à large bande de fabrication et de genre différents, on a procédé à un étalonnage comparatif dans une cellule TEM à diverses fréquences dans la plage de quelques kHz jusqu'à 30 MHz. Outre des instruments de mesure de très bonne qualité, on en a trouvé d'autres dont le comportement différait grandement des spécifications. Les principales sources d'erreurs étaient les suivantes:

- influences perturbatrices dans le câble de connexion,
- défektivité non décelable au premier abord,
- erreurs dans les données d'étalonnage,
- différence marquée par rapport à l'isotropie.

Il est recommandé, à partir de ces constatations, de ne pas se fier uniquement aux spécifications lors de l'utilisation de systèmes de mesure isotropes, mais de vérifier leur comportement dans des champs d'essai appropriés.

Toutes les incertitudes de mesures individuelles précitées doivent être groupées pour former une incertitude générale du résultat de mesure. A cet effet, on appliquera le procédé suivant, recommandé par la Western European Calibration Cooperation (WECC 1990): les incertitudes individuelles relatives u_i doivent être réunies comme suit pour constituer l'incertitude générale:

$$u = 2 \sqrt{\sum_i u_i^2 / 3} \quad (4.1)$$

où l'on considère que les valeurs $\pm u_i$ représentent la limite supérieure et inférieure de l'erreur possible engendrée par la grandeur d'influence i . En règle générale les gammes d'incertitude indiquées dans les spécifications des appareils ont exactement cette signification. Avec le facteur 2, l'intervalle $\pm u$ prend une signification comparable à celle de l'écart $\pm 2\sigma$ d'une distribution normale. Si l'une des composantes u_i prédomine nettement, l'incertitude globale ne doit pas être calculée selon la formule précitée, mais doit correspondre à celle de la composante dominante. Dans la gamme des hautes fréquences, les incertitudes de mesure sont souvent données en décibels (dB). Avant leur addition pour définir une incertitude globale, ces grandeurs logarithmiques doivent être linéarisées. Les contributions positives et négatives à l'incertitude sont donc différentes. Pour l'appréciation des mesures d'immissions, seule l'incertitude de mesure dans une direction positive est toutefois significative. La linéarisation se fait selon les formules suivantes:

$$u_i = 100 \cdot (10^{(\alpha_i/20)} - 1) \quad \text{pour les intensités de champ}$$

$$u_i = 100 \cdot (10^{(\alpha_i/10)} - 1) \quad \text{pour les densités de puissance}$$

où α_i : incertitude de mesure due à la grandeur d'influence i , en dB
 u_i : incertitude de mesure due à la grandeur d'influence i , en %

Comme illustration, on peut considérer l'exemple suivant:

Lors d'une mesure d'immission, les incertitudes α_i tirées des spécifications sont connues ou ont été évaluées à l'aide de tests:

Grandeur d'influence	α_i (dB)	Intensité de champ		Densité de puissance	
		$+u_i$ (%)	u_i^2	$+u_i$ (%)	u_i^2
Étalonnage	± 1	12.2	149	25.9	670
Réponse en fréquence	± 1	12.2	149	25.9	670
Anisotropie	± 0.5	5.9	35	12.2	149
Couplage dans le câble	± 2	25.9	670	58.5	3421
Somme au carré			1003		4910
Incertitude globale (éq.4.1)		37		81	

L'incertitude globale de mesure en direction des valeurs supérieures se monte ainsi respectivement à +37 % par rapport à l'intensité de champ et à +81 % par rapport à la densité de puissance. Si l'on pouvait éliminer l'incertitude due à la réponse en fréquence (par étalonnage à la fréquence à mesurer), on pourrait réduire l'incertitude de mesure globale à +34 % pour l'intensité de champ et à +75 % pour la densité de puissance. En revanche, si l'on pouvait éviter entièrement les influences perturbatrices du câble (au moyen d'une liaison en fibres optiques), on pourrait ramener alors toute l'incertitude de mesure à +21 % pour l'intensité de champ et à +45 % pour la densité de puissance.

En principe, on mettra tout en oeuvre pour réduire l'incertitude de mesure. Le groupe de travail est d'avis qu'en l'état actuel de la technique et en procédant avec prudence, on doit s'attendre à une incertitude de mesure de ± 3 dB, même dans des conditions optimales (soit +41 % pour l'intensité de champ et +100 % pour la densité de puissance). Dans les champs proches, l'incertitude peut être encore plus élevée.

Les variations locales et temporelles des immissions ne sont pas considérées comme une incertitude de mesure. A cet effet, il a déjà été précisé que, en principe, l'immission la plus élevée (locale et temporelle) dans la zone à examiner était primordiale pour l'appréciation (voir 4.7).

4.12 Evaluation et appréciation

La valeur temporelle et locale la plus élevée de la grandeur d'examen est déterminante pour la comparaison avec des valeurs limites d'immissions. Pour le choix des emplacements de mesure, on consultera le paragraphe 4.7.

On s'efforcera de représenter par une carte des intensités de champ la dépendance locale de la grandeur d'examen considérée.

Si des signaux provenant de diverses directions, ou ayant une polarisation différente sont mesurés successivement, on devra additionner respectivement les densités de puissance et les intensités de champ de tous les signaux importants pouvant se présenter simultanément. L'addition sera effectuée selon les formules du tableau 3, l'addition portant sur toutes les fréquences et toutes les directions spatiales ou les polarisations. Si la dépendance temporelle des divers signaux n'est pas assez bien connue, on prendra pour le total la grandeur d'examen maximale de chaque signal discret (selon tableau 2). Ainsi, le cas le plus défavorable sera pris en compte.

Dans la situation de champ proche, la grandeur examinée doit être comparée à la valeur limite d'immission appropriée aussi bien pour le champ électrique que pour le champ magnétique. L'immission est excessive lorsqu'une ou les deux grandeurs d'examen dépassent la valeur limite d'immission (VLI). Dans la situation du champ lointain, l'examen de l'une des deux composantes de champ ou de la densité de puissance suffit.

Lors de l'appréciation d'une immission, l'incertitude de mesure \pm en direction des valeurs plus élevées (voir 4.11) doit être prise en considération. Lors de la fixation de la VLI, on a inclus un facteur de sécurité qui tient compte des connaissances médicales incomplètes (effets de longue durée; groupes de personnes sensibles; extrapolation des résultats provenant de l'expérimentation animale à l'être humain; effets synergiques possibles avec d'autres nuisances pour l'environnement; constatations non confirmées),

mais qui ne tient en revanche pas compte de l'incertitude de la mesure d'immission. Il n'est donc pas permis de réduire ce facteur de sécurité en introduisant une grande incertitude de mesure. Pour cette raison, une immission n'est pas excessive lorsque:

$$x (1 + u/100) \leq \text{VLI} \text{ (voir figure 3, cas 1),}$$

où

x: grandeur d'examen (mesure)
u: incertitude de mesure en direction de valeurs plus élevées, en % (paragraphe 4.11)

La définition de l'incertitude de mesure dans l'équation 4.1 garantit que la VLI sera effectivement dépassée avec une probabilité inférieure à 5 %. Ce risque peut être accepté, pour autant que l'incertitude de mesure ait été déterminée correctement.

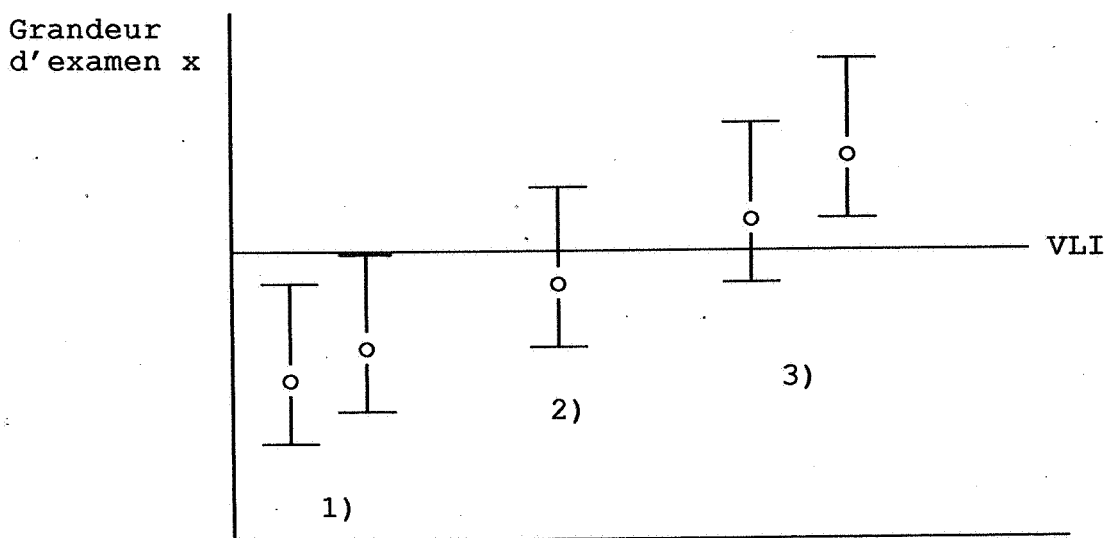


Figure 3: Appréciation d'immissions

o: valeur mesurée
Limite supérieure de l'intervalle représenté: $(x+u)$
1): immissions admissibles
2) et 3): immissions excessives

Si une immission est proche de la VLI, il faut tout mettre en oeuvre techniquement pour réduire autant que possible l'incertitude de mesure. En même temps cet effort évitera que l'exploitant d'installations émettrices ne doive se plier à des exigences exagérées résultant de mesures imprécises. Des résultats de mesure du type 2 à la figure 3, qui indiquent un dépassement de la VLI en raison d'une incertitude de mesure importante, ne doivent pas de ce fait être acceptés lorsque il est clair que l'incertitude de mesure peut être réduite par un meilleur équipement et par une plus grande expérience.

Zusammenfassung

Eine vom BUWAL einberufene Arbeitsgruppe von Messfachleuten gibt mit diesem Bericht ihre Empfehlung für die Messung nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung in der Umwelt im Frequenzbereich von 100 kHz bis 300 GHz ab. Das Schwergewicht liegt auf der messtechnischen Erfassung und Beurteilung von Immissionen im Bereich der Immissionsgrenzwerte von IRPA¹⁾. Die Empfehlung enthält allgemeingültige Grundsätze und Mindestanforderungen, ohne im Detail auf konkrete Immissionssituationen einzutreten. Behandelt werden die Messplanung, die Festlegung von Messstandort, -zeit und -dauer, Mindestanforderungen an die Messeinrichtung, die eigentliche Durchführung der Messung und mögliche Fehlerquellen. Ausführlich beschrieben werden die Abschätzung der Messunsicherheit und die Beurteilung einer Immission unter Berücksichtigung der Messunsicherheit. Dem Bericht liegen Checklisten für die Vorbereitung und die Durchführung einer Immissionsmessung bei.

Résumé

On trouvera ici les résultats des travaux d'un groupe de spécialistes auquel l'OFEFP a confié la tâche de formuler des recommandations pour la mesure dans l'environnement du rayonnement électromagnétique non ionisant situé dans la gamme de fréquences comprise entre 100 kHz et 300 GHz. L'accent a surtout été mis sur la mesure et l'appréciation des rayonnements dont l'intensité est approchante des valeurs limites d'immission déterminées par l'IRPA¹⁾. Ces recommandations, qui rappellent des principes et des conditions de portée générale sans entrer dans des détails pratiques forcément variables selon le cas particulier, traitent les questions suivantes: organisation des mesures, et notamment définition du lieu, de la période et de la durée, exigences techniques minimales applicables aux appareils, réalisation proprement dite des mesures et sources d'erreur possibles. L'estimation de l'incertitude des mesures et l'appréciation des immissions compte tenu de cette incertitude ont été commentées de manière circonstanciée. Enfin, le présent document contient des listes de contrôle pour la préparation et la réalisation de mesures des immissions.

1) International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54, 115-123, 1988

Riassunto

Il presente rapporto contiene i risultati dei lavori di un gruppo di esperti al quale l'UFAFP ha affidato il compito di elaborare raccomandazioni per misurare nell'ambiente le radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti situate nella gamma di frequenze compresa fra 100 kHz e 300 GHz. L'accento è stato posto soprattutto sulla misurazione e la valutazione delle radiazioni la cui intensità è vicina ai valori limite d'immissione fissati dall'IRPA¹⁾. Le raccomandazioni, che si rifanno a principi e a condizioni di portata generale senza entrare in particolari pratici variabili a seconda di ogni singolo caso, trattano i punti seguenti: organizzazione delle misurazioni, segnatamente definizione del luogo, del periodo e della durata, esigenze tecniche minime applicabili agli apparecchi, realizzazione vera e propria delle misurazioni e fonti possibili di errore. La valutazione del margine di incertezza legato a tali misurazioni e la valutazione stessa delle immissioni, conto tenuto di tale margine di incertezza, sono commentate in modo approfondito. Infine il presente rapporto contiene elenchi di controllo utili per la preparazione e la realizzazione di dette misurazioni.

Abstract

A working group consisting of measurement specialists which was set up by the Federal Office of Environment, Forests and Landscape presents a recommendation for the measurement of nonionizing electromagnetic radiation in the environment within the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. Emphasis is given to the measurement and assessment of those exposures which are close to the exposure limit values recommended by IRPA¹⁾. The recommendation contains general measurement principles and minimum requirements for instruments; actual examples of exposure situations are not discussed in detail. The measurement preparation, considerations concerning site, time and duration of the measurement, minimum requirements for measuring instruments are discussed as well as the actual measurement procedure and possible errors. The estimation of the measurement uncertainty and the assessment of an exposure situation, taking into account the measurement uncertainty, are presented in detail. Two checklists for the preparation and realization of an exposure measurement are included.

1) International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz. Health Phys. 54, 115-123, 1988

Appendice 1: Listes de contrôle pour la planification et la réalisation des mesures

Les deux listes de contrôle suivantes ont été conçues comme des aides-mémoire, pour que les informations importantes puissent être obtenues suffisamment tôt et soient complètes pour la planification et la réalisation des mesures du rayonnement électromagnétique non ionisant.

Liste de contrôle I: Préparation

Les points suivants doivent être élucidés dans le cadre de la planification des mesures. Suivant le cas, une mesure indicative dans la zone à examiner peut déjà se révéler nécessaire.

1. Source

- gamme de fréquences
- fréquences individuelles ou groupées
- harmoniques, rayonnements non essentiels
- modulation: aucune, pulsée, AM, FM, BLU, etc.
- polarisation: horizontale, verticale, circulaire
- caractéristique de rayonnement
- puissance de sortie: nominale, réelle; variations temporelles
- paramètres d'exploitation (par ex. heures et direction d'émission)
- résultats de mesures de sources comparables
- autres sources proches, susceptibles d'influencer les mesures
- champs électriques ou magnétiques statiques importants (équipements d'alimentation)
- état de l'installation: fonctionnement conforme aux prescriptions; dégâts, présence de fuites

2. Zone à examiner

- autorisation d'accès
- accessibilité pour la population
- genres d'utilisation
- durée de séjour typique des personnes
- estimation des intensités de champ
- champs hétérogènes: réflexions, résonances, propagation par trajets multiples
- champ proche/champ lointain
- valeurs limites importantes et grandeurs d'examen
- objets perturbateurs dans la zone à examiner (source secondaire, élément absorbant)
- conditions stables ou variables dans la zone à examiner
- fixation des emplacements et des heures de mesures
- détermination de la hauteur de mesure
- sécurité des personnes effectuant des mesures

3. Equipements de mesure

- sonde/antenne: à large bande ou à bande étroite; isotrope ou directive; sensible au champ E ou H; avec polarisation circulaire ou linéaire
- ligne de connexion entre la sonde et l'appareil de mesure
- appareil de mesure: analyseur de spectre, récepteur de mesure, appareil à affichage des intensités de champ, etc.
- fixation de la sonde/de l'antenne
- calcul de la valeur moyenne
- source de substitution appropriée pour le test de fonctionnement
- test de fonctionnement, mesure indicative éventuelle, vérification que l'équipement de mesure convient pour les opérations prévues
- étalonnage
- incertitude de mesure

Liste de contrôle II: Compte rendu de mesure

Les informations suivantes doivent, autant que possible, être consignées dans le compte rendu durant les travaux de mesure:

- description de l'équipement de mesure
- état et paramètres de fonctionnement de la source
- croquis et description de l'emplacement de mesure, de l'environnement proche et de la disposition de l'équipement de mesure
- moment et durée des mesures
- hauteur de la sonde/de l'antenne au-dessus du sol
- écart de la sonde/de l'antenne par rapport aux objets conducteurs très proches
- polarisation et orientation de la sonde/de l'antenne
- réglages des instruments de mesure
- méthode et durée du calcul des moyennes
- valeurs de mesure
- observations relatives aux variations temporelles des valeurs de mesure
- conditions atmosphériques (température, humidité)
- nature et revêtement du sol

Appendice 2: Mesures d'immissions des installations de radar

Les installations de radar émettent en règle générale des signaux de haute fréquence modulés par impulsions. Ces impulsions brèves se succèdent à des intervalles réguliers. Ci-après, on trouvera quelques abréviations et définitions utilisées par la suite:

f_0	Fréquence porteuse (Hz)
τ	Durée d'impulsion (s)
PRF	Fréquence de répétition de l'impulsion (Hz)
PRI	Intervalle de répétition de l'impulsion. $PRI=1/PRF$ (s)
V	Rapport de modulation (duty factor). $V=\tau/PRI$
t_s	Temps de balayage (scan time; pour les antennes mobiles) (s)
Enveloppe:	Courbe entourant le train d'impulsions, résultant, à un emplacement de mesure fixe, de la rotation ou d'un autre mouvement de l'antenne (voir figure 4c).
$S(t)$	Valeur momentanée de la densité de puissance (W/m^2)
S_p	Densité de puissance impulsionnelle: valeur moyenne de la densité de puissance durant une impulsion (W/m^2)
$S_{p, max}$	Densité de puissance impulsionnelle au maximum de l'enveloppe
$\langle S \rangle$	Valeur moyenne de la densité de puissance, calculée pendant $t \gg PRI$ (W/m^2)

Les conditions se rapportant aux immissions de radars sont représentées schématiquement à la figure 4. Dans le cas le plus compliqué, il s'agit de déroulements périodiques en 4 domaines temporels différents:

- oscillation de la fréquence porteuse $1/f_0$ (typique ps à ns)
- durée d'impulsion (typique μs)
- intervalle de répétition de l'impulsion PRI (typique ms)
- période de balayage t_s pour les antennes mobiles (typique s)

La figure 4a montre la modulation d'impulsion de la fréquence porteuse. La figure 4b fait apparaître un train d'impulsions successives de même intensité, telles qu'elles se produisent avec une antenne non mobile. Dans cet exemple l'échelle temporelle est comprimée de sorte que les impulsions n'apparaissent plus que comme des pics. Dans la figure 4c enfin, on voit les conditions se rapportant à une antenne mobile. Dans ce cas, des immissions notables se manifestent uniquement au moment où l'antenne émet précisément dans la direction de l'observateur.

Selon le tableau 2, on doit examiner deux grandeurs en cas d'immissions pulsées:

- a) la densité de puissance moyenne $\langle S \rangle$ pendant 6 minutes ne doit pas dépasser la VLI du tableau 1.
- b) la densité de puissance impulsionnelle S_p ne doit pas dépasser de plus de 1000 fois la VLI du tableau 1.
Pour les antennes mobiles, la densité de puissance impulsionnelle $S_{p, \max}$, au maximum de l'enveloppe due au déplacement, est déterminante (voir figure 4c).

Selon les caractéristiques du signal, l'un des deux critères suivants est déterminant:

Pour une antenne non mobile (figure 4b):

Rapport de modulation $V \geq 0.001$: si le critère a) est rempli, b) est alors obligatoirement respecté. Il suffit ainsi de mesurer la densité de puissance moyenne $\langle S \rangle$.

Rapport de modulation $V < 0.001$: si le critère b) est rempli, a) est obligatoirement aussi respecté. Il suffit alors de mesurer la densité de puissance impulsionnelle S_p .

Pour une antenne mobile (figure 4c):

En règle générale, le critère b) est déterminant pour tous les rapports de modulation rencontrés dans la pratique. Ainsi, la densité de puissance impulsionnelle $S_{p,max}$, au maximum de l'enveloppe, doit être mesurée.

Pour mesurer la densité de puissance moyenne $\langle S \rangle$, on peut recourir à des systèmes de mesure isotropes à large bande, dans la mesure où ils sont conçus à cette fin. Cependant, la prudence est de rigueur, car il faut éviter que la sonde ne soit saturée par la puissance des impulsions qui est beaucoup plus grande que la puissance moyenne. Il est recommandé de contrôler la linéarité dans un champ de test connu, présentant des paramètres de signaux comparables. Dans le cas d'une antenne mobile, la constante de temps du système de mesure doit être choisie aussi petite que possible, pour que la courbe d'enveloppe soit prise en considération sans affaiblissement. Pour une antenne mobile la moyenne de 6 minutes sera calculée en règle générale de manière externe (sur un traceur ou à l'aide d'un ordinateur). La densité de puissance impulsionnelle S_p résulte de la densité de puissance moyenne $\langle S \rangle$, selon

$$S_p = \langle S \rangle / V.$$

Pour la mesure directe de la densité de puissance impulsionnelle S_p , on utilise des analyseurs de spectre, combinés avec des antennes appropriées. La densité de puissance d'impulsion $S_{p,max}$ au maximum de l'enveloppe peut être prise en compte de façon fiable à l'aide de la fonction "maximum hold" de l'analyseur de spectre. En raison de la largeur de bande FI de l'analyseur de spectre, généralement insuffisante pour les impulsions de radar, il convient de régler sa sensibilité à partir d'un signal de test du même type. Il est en outre recommandé de consulter à cet effet les publications adéquates du fabricant de l'appareil (application notes, par ex. de Hewlett Packard 1971).

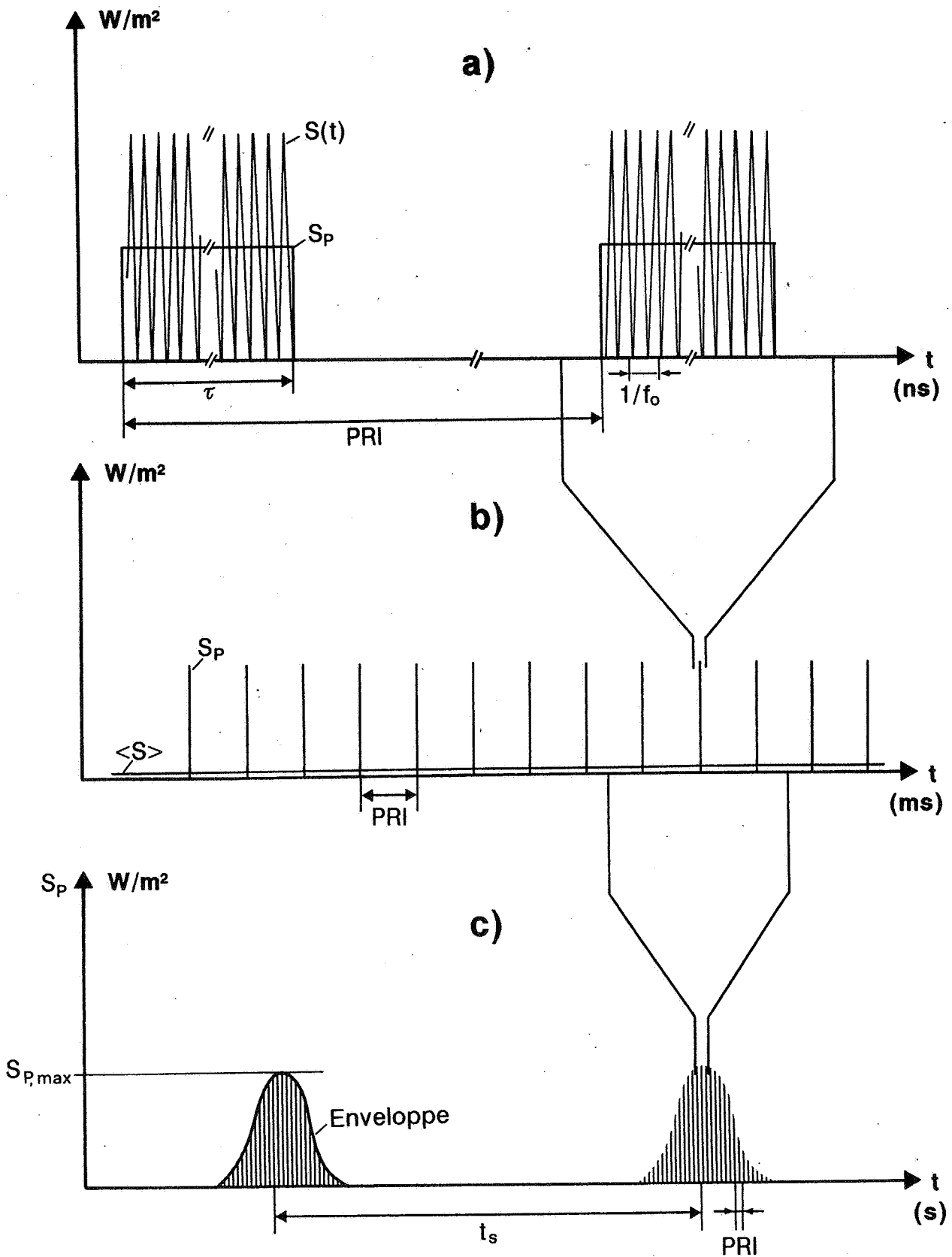


Figure 4: Immissions de radar

a) Deux impulsions

b) Un train d'impulsions de même intensité (antenne d'émission immobile)

c) Variation de la densité de puissance impulsionnelle pour une antenne d'émission mobile

Bibliographie

- ANSI (1981): American National Standard ANSI C95.5-1981: Recommended Practice for the Measurement of Hazardous Electromagnetic Fields -- RF and Microwave.
The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 345 East 47th Street, New York 10017
- ANSI (1991): American National Standard, C95.3-1991: Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields -- RF and Microwave.
The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 345 East 47th Street, New York 10017
- ASE (1983): Prescriptions de sécurité de l'ASE, 1054-25.1983/CEI 335-25. Sécurité des appareils électrodomestiques et analogues. 2^e partie: Règles particulières pour les appareils de cuisson à micro-ondes.
- Aslan E. (1983): An ANSI Radiation Protection Guide Conformal Probe.
Microwave Journal, April 1983, 87-91
- Australie (1988): Australian Standard 2772.2-1988: Radiofrequency Radiation, Part 2 - Principles and Methods of Measurement, 300 kHz to 100 GHz.
Standards Association of Australia.
- Bossert Th. und Dinter H. (1988): Beurteilung der Gefährlichkeit starker elektromagnetischer Felder - Kalibrierung und Messgenauigkeit von Nahfeldsonden im Bereich 30 kHz-30 MHz.
ITG-Fachbericht 106: Hörrundfunk. Vorträge der ITG-Fachtagung vom 14.-16.11.1988, Mainz. S. 57-62
VDE-Verlag, Berlin
- DIN/VDE (1982): DIN/VDE 0848, Teil 1: Gefährdung durch elektromagnetische Felder. Mess- und Berechnungsverfahren.
- Glimm J. und Münter K. (1989): Feldmesssonden. Monitore für elektromagnetische Strahlung.
Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz Fb 585, Dortmund
- Hewlett Packard (1971). Spectrum Analysis. Pulsed RF.
Application Note 150-2, Nov. 1971
- IRPA (1985). International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Review of Concepts, Quantities, Units and Terminology for Non-Ionizing Radiation Protection.
Health Phys. 49, 1329-62
- IRPA (1988). International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100 kHz to 300 GHz.
Health Phys. 54, 115-123

IRPA (1990): Communication personnelle

Joyner K.H. (1988): Measurement of Electromagnetic Radiation below 100 GHz. in: "Non-Ionizing Radiations. Physical Characteristics, Biological Effects and Health Hazard Assessment", Proc. International Non-Ionizing Radiation Workshop, Melbourne, 5.-9. April 1988; ed. M.H. Repacholi, p. 373-393. IRPA/INIRC

Kanda M. et al. (1986): Standards for Electromagnetic Field Measurements. Proc. IEEE 74, 120-128

NARDA Model 8682: ANSI C95.1-1982 RF Protection Guide Conformal Probe. Technical data.

NCRP 1981: Radiofrequency Electromagnetic Fields. Properties, Quantities and Units, Biophysical Interaction, and Measurements. National Council on Radiation Protection, and Measurements. NCRP Report No. 67, Washington D.C., p. 12

OFEFP (1990): Effets biologiques du rayonnement électromagnétique non ionisant sur l'homme et son environnement. 1^{re} partie: gamme de fréquences de 100 kHz à 300 GHz. Les cahiers de l'environnement n° 121, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, juin 1990.

Önorm (1986): Önorm S 1120: Mikrowellen und Hochfrequenzbereich. Begriffsbestimmungen, zulässige Werte, Messungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Seibersdorf (1988): Schutz vor nichtionisierender elektromagnetischer Strahlung. Teil 1: Hochfrequenz- und Mikrowellenstrahlung im Frequenzbereich 10 kHz-3000 GHz. S. 49-75. Österreichisches Forschungszentrum Seibersdorf, OEFZS--4436.

Stuchly M.A. and Stuchly St.S. (1986): Experimental Radio and Microwave Dosimetry. in: "CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields", ed. C.P. Polk, E. Postow. CRC Press, Boca Raton, p. 229-249.

Stuchly M.A. and Stuchly St.S. (1987): Measurements of Electromagnetic Fields in Biomedical Applications. CRC Crit. Rev. in Biomed. Eng. 14, 241-255.

Tell R.A. (1983): Instrumentation for Measurement of Electromagnetic Fields: Equipment, Calibrations and Selected Applications. Part 1: Radiofrequency Fields. in: "Biological Effects and Dosimetry of Nonionizing Radiation", ed. M. Grandolfo, S.M. Michaelson, A. Rindi. Plenum Press, New York, p. 95-162.

Tell R.A. (1989): An Investigation of RF Induced Hot Spots and their Significance Relative to Determining Compliance with the ANSI Radiofrequency Protection Guide. p. 44 ff. Report Prepared for the National Association of Broadcasters, 1771 N Street, N.W., Washington, D.C. 20036

Tofani S. and Kanda M. (1989): Instrumentation for Electromagnetic Fields Exposure Evaluation and its Accuracy.
in: "Electromagnetic Biointeraction. Mechanisms, Safety Standards, Protection Guides", ed. G. Franceschetti, O.P.Gandhi, M.Grandolfo.
Plenum Press, New York, p. 175-191.

WECC (1990): Western European Calibration Cooperation: Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations.
Projet WECC Doc. 19-1990