

## RAPPORT UIT-R BS.2037

**Evaluation des champs rayonnés par des systèmes d'émission de radiodiffusion  
de Terre fonctionnant dans une bande de fréquences quelconque aux fins  
d'évaluation de l'exposition à des rayonnements non ionisants**

(Question UIT-R 50/6)

(2004)

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1 Introduction .....	3
2 Caractéristiques des champs électromagnétiques.....	3
2.1 Caractéristiques générales .....	3
2.1.1 Composantes du champ .....	3
2.1.2 Champ lointain.....	4
2.1.3 Champ proche.....	6
2.1.4 Polarisation .....	7
2.1.5 Modulation.....	7
2.1.6 Diagrammes de brouillage.....	13
2.2 Niveaux du champ à proximité d'antennes de radiodiffusion.....	13
2.2.1 Bandes des ondes kilométriques/hectométriques (150-1 605 kHz).....	13
2.2.2 Bandes des ondes décamétriques (3-30 MHz).....	13
2.2.3 Bandes des ondes métriques/décimétriques.....	14
2.2.4 Bande des ondes centimétriques (3-30 GHz), (0,1-1 m).....	14
2.3 Champ de fréquence mixte .....	16
2.4 Champs électromagnétiques à l'intérieur de bâtiments.....	17
3 Calculs .....	17
3.1 Procédures.....	17
3.1.1 Solutions en boucle fermée.....	17
3.1.2 Procédures numériques.....	18

	Page
4 Mesures.....	21
4.1 Procédures.....	21
4.1.1 Bandes des ondes kilométriques/hectométriques .....	21
4.1.2 Bandes des ondes décamétriques.....	21
4.1.3 Bandes des ondes métriques/décimétriques.....	21
4.1.4 Bandes des ondes centimétriques .....	22
4.2 Instrumentation .....	22
4.2.1 Introduction.....	22
4.2.2 Caractéristiques des instruments de mesure du champ électrique et du champ magnétique.....	23
4.2.3 Types d'instruments à bande étroite et spécifications de ces instruments .....	24
4.3 Comparaison entre les prévisions et les mesures.....	25
5 Précautions à prendre au niveau des stations d'émission et à leur proximité .....	25
5.1 Précautions à prendre pour limiter les effets directs des rayonnements RF sur la santé .....	25
5.1.1 Mesures de précaution pour les employés (travailleurs) .....	26
5.1.2 Mesures de précaution pour le public .....	27
5.2 Précautions à prendre pour se protéger contre les effets indirects des rayonnements RF .....	28
Appendice 1 – Exemples des valeurs calculées du champ à proximité d'antennes de radio-diffusion.....	29
Appendice 2 – Comparaison entre prévisions et mesures.....	42
Appendice 3 – Limites et niveaux.....	64
Appendice 4 – Autres méthodes d'évaluation .....	72
Appendice 5 – Dispositifs électromédicaux.....	77
Appendice 6 – Références bibliographiques.....	78

## 1 Introduction

Les effets des rayonnements électromagnétiques sont étudiés depuis de nombreuses années et on a essayé de fixer des limites précises qui permettraient de protéger l'homme contre des effets indésirables de ces rayonnements. Les études effectuées par différents organismes dans de nombreux pays ont abouti à l'élaboration de divers règlements administratifs. On notera, et ceci est compréhensible, que tous ces efforts n'ont pas abouti à l'élaboration d'une norme unique dans ce domaine.

Le présent Rapport est destiné à fournir une base unique pour calculer et estimer les valeurs des rayonnements électromagnétiques provenant d'une station de radiodiffusion à certaines distances bien précises du site de l'émetteur. Les organismes responsables pourront alors, sur la base de ces informations, élaborer des normes appropriées susceptibles d'être utilisées pour protéger l'homme contre une exposition indésirable à des rayonnements nocifs. Les valeurs effectives à appliquer, quelle que soit la réglementation, dépendront bien entendu des décisions auxquelles les organismes sanitaires concernés seront parvenus, à l'échelle nationale ou internationale.

On notera que ce Rapport et les Recommandations UIT-T traitent de sujets similaires tout en faisant ressortir différents aspects du même thème général. Par exemple, la Recommandation UIT-T K.51 (Critères de sécurité des équipements de télécommunication) et la Recommandation UIT-T K.61 (Directives pour la mesure et la prédiction numérique des champs électromagnétiques pour l'observation des limites d'exposition humaine aux rayonnements des installations de télécommunication) donnent des indications sur l'observation des limites d'exposition pour les systèmes de télécommunication. Des renseignements pertinents de référence sont inclus dans l'Appendice 6.

## 2 Caractéristiques des champs électromagnétiques

### 2.1 Caractéristiques générales

Le présent paragraphe s'intéresse aux caractéristiques particulières des champs électromagnétiques présentant un intérêt pour le présent Rapport, et fait en particulier la distinction entre champ proche et champ lointain. Des équations simples sont données pour calculer la densité de puissance et le champ dans la région de champ lointain. Les termes de polarisation et de diagrammes de brouillage sont définis à la fin du paragraphe.

#### 2.1.1 Composantes du champ

Le champ électromagnétique rayonné par une antenne comprend diverses composantes de champ électrique et magnétique dont les valeurs diminuent en fonction de la distance,  $r$ , par rapport à la source du rayonnement. Les principales composantes sont les suivantes:

- le champ lointain (Fraunhofer), appelé également champ de rayonnement, dont la valeur diminue de façon inversement proportionnelle à la distance,  $1/r$ ;
- le champ proche rayonnant (Fresnel), appelé également champ inductif. Sa structure dépend beaucoup de la forme, des dimensions et du type de l'antenne, même si divers critères ont été définis et sont couramment utilisés pour caractériser ce comportement;
- le champ proche réactif (Rayleigh), appelé également champ quasi statique, dont la valeur diminue dans un rapport de  $1/r^3$ .

Etant donné que les valeurs du champ inductif et du champ quasi statique diminuent rapidement au fur et à mesure que la distance par rapport à la source de rayonnement augmente, ces champs ne sont significatifs qu'à proximité de l'antenne d'émission, c'est-à-dire dans la région dite de champ proche.

Par ailleurs, le champ de rayonnement est l'élément dominant dans la région dite de champ lointain. C'est en effet ce champ que traverse un signal radiophonique ou un signal de télévision depuis l'émetteur jusqu'à un récepteur distant.

### 2.1.2 Champ lointain

Dans la région de champ lointain, le champ électromagnétique présente essentiellement la forme d'une onde plane, c'est-à-dire que le champ électrique et le champ magnétique sont en phase et que le rapport de leurs amplitudes est constant. En outre, le champ électrique et le champ magnétique sont en angle droit l'un par rapport à l'autre et sont situés dans un plan perpendiculaire au sens de la propagation.

On considère souvent que les conditions propres au champ lointain s'appliquent à des distances supérieures à  $2D^2/\lambda$ , où  $D$  est la dimension linéaire maximale de l'antenne.

Toutefois, il faut être prudent si on applique ce critère à une antenne de radiodiffusion pour les raisons suivantes:

- ce critère découle de considérations relatives à des antennes plans;
- on suppose que  $D$  est grande par rapport à  $\lambda$ .

Lorsque les conditions susmentionnées ne sont pas remplies, il convient d'utiliser pour le champ lointain une distance supérieure à  $10 \lambda$ .

#### 2.1.2.1 Densité de puissance

Le vecteur densité de puissance, vecteur de Poynting  $\mathbf{S}$ , d'un champ électromagnétique est donné par le produit vectoriel de la composante électrique  $\mathbf{E}$  et de la composante magnétique  $\mathbf{H}$  du champ:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1)$$

Pour la région de champ lointain, dans des conditions idéales, c'est-à-dire lorsqu'il est important que le sol ou d'autres obstacles n'aient pas d'influence, cette équation peut être simplifiée car le champ électrique, le champ magnétique et le sens de propagation sont perpendiculaires entre eux. Par ailleurs, le rapport des amplitudes du champ électrique,  $E$ , et du champ magnétique,  $H$ , est une constante  $Z_0$ , appelée impédance caractéristique de l'espace libre<sup>1</sup>, égale à environ  $377 \Omega$  (ou  $120\pi \Omega$ ).

Ainsi, dans la région de champ lointain, la densité de puissance,  $S$ , en espace libre est donnée par l'équation non vectorielle suivante:

$$S = E^2/Z = H^2 Z_0 \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> En général, l'impédance caractéristique d'un milieu est donnée par la formule  $z = \sqrt{(\mu/\epsilon)}$  où  $\mu$  est la perméabilité magnétique ( $= 1,2566 \times 10^{-6}$  F/rn en espace libre) et  $\epsilon$  est la permittivité ( $= 8,85418 \times 10^{-12}$  H/rn en espace libre).

La densité de puissance – quelle que soit la distance et quelle que soit la direction – peut être calculée dans la région de champ lointain à l'aide de l'équation suivante:

$$S = P G_i / (4\pi r^2) \quad (3)$$

où:

$S$ : densité de puissance ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) dans une direction donnée

$P$ : puissance (W) fournie à la source de rayonnement, dans l'hypothèse d'un système sans perte

$G_i$ : facteur de gain de la source de rayonnement dans la direction considérée, rapporté à un élément rayonnant isotrope

$r$ : distance (m) par rapport à la source de rayonnement.

Le produit  $PG_i$  dans l'équation (3) est appelé p.i.r.e. et représente la puissance qu'un élément rayonnant isotrope fictif devrait émettre pour produire la même intensité de champ au point de réception.

Il faut tenir compte du diagramme d'antenne pour des densités de puissance dans d'autres directions.

Pour utiliser l'équation (3) avec une antenne dont le gain  $G_a$  est rapporté à une antenne de référence de gain isotrope  $G_r$ , par exemple un doublet demi-onde ou une antenne unipolaire courte, il faut remplacer le facteur de gain  $G_i$  par le produit  $G_r \cdot G_a$  comme dans l'équation (4). Le facteur  $G_r$  pertinent est donné dans le Tableau 1:

$$S = P G_r G_a / (4\pi r^2) \quad (4)$$

TABLEAU 1

**Facteurs de gain isotrope pour différents types d'antenne de référence**

Type d'antenne de référence	Facteur de gain isotrope $G_r$	Applications types concernées par le type d'antenne de référence
Élément rayonnant isotrope	1,0	Radar, liaison radioélectrique par satellite ou de Terre
Doublet demi-onde	1,64	Télévision, radiodiffusion en ondes métriques et parfois en ondes décamétriques
Antenne unipolaire courte	3,0	Radiodiffusion en ondes kilométriques, hectométriques et parfois décamétriques

Ainsi, lorsque le gain d'antenne  $G_d$  ( $G_a = G_d$ ) est rapporté à celui d'un doublet demi-onde:

$$S = 1,64 PG_d / (4\pi r^2) \quad (5)$$

où:

$G_d$ : gain de l'antenne rapporté à un doublet demi-onde.

De même, lorsque le gain de l'antenne  $G_a = G_m$  est rapporté à celui d'une antenne unipolaire courte:

$$S = 3,0 PG_m / (4\pi r^2) \quad (6)$$

où:

$G_m$ : gain de l'antenne rapporté à une antenne unipolaire courte.

### 2.1.2.2 Champ

Dans les équations (2) à (10) on suppose que les conditions sont celles propres à la région de champ lointain où le champ se présente sous forme d'une onde plane; elles ne concernent pas les calculs pour la région de champ proche.

Si on insère l'équation (2) dans l'équation (3) pour éliminer  $S$  et si on introduit un facteur  $C$  pour tenir compte de la caractéristique de direction de la source de rayonnement, on obtient alors l'équation (7) qui permet de calculer le champ électrique, dans la région de champ lointain, d'une source de rayonnement:

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{PG_i}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{30PG_i} \quad (7)$$

où:

$E$ : champ électrique (V/m)

$Z_0 = 377 \Omega$ , impédance caractéristique de l'espace libre

$P$ : puissance fournie à la source de rayonnement (W), dans l'hypothèse d'un système sans perte

$C$ : facteur ( $0 \leq C \leq 1$ ) qui tient compte de la caractéristique de direction de la source de rayonnement (dans la direction principale du rayonnement,  $C = 1$ ).

Si le gain de l'antenne est rapporté à celui d'un doublet demi-onde ou d'une antenne unipolaire courte et non à celui d'un élément rayonnant isotrope, il convient d'utiliser en lieu et place de  $G_i$ , les facteurs  $G_d$  et  $G_m$  respectivement dans les équations (8) et (9).

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{1,64PG_d}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{49,2PG_d} \quad (8)$$

$$E = \sqrt{\frac{Z_0}{4\pi}} \frac{\sqrt{3PG_m}}{r} \quad C = \frac{C}{r} \sqrt{90PG_m} \quad (9)$$

Pour calculer le champ magnétique, dans la région de champ lointain, d'une source de rayonnement, on utilise l'équation (10):

$$H = E/Z_0 \quad (10)$$

où:

$E$ : champ électrique (V/m)

$H$ : champ magnétique (A/m)

$Z_0 = 377 \Omega$  ( $120\pi$ ), impédance caractéristique de l'espace libre.

### 2.1.3 Champ proche

La structure du champ dans la région de champ proche est plus complexe que celle décrite ci-dessus pour la région de champ lointain. Dans la région de champ proche, il y a une relation de phase et d'amplitude arbitraire entre le vecteur champ électrique et le vecteur champ magnétique et les valeurs de champ varient considérablement d'un point à un autre. Par conséquent, pour déterminer la nature du champ proche il faut calculer ou mesurer la phase et l'amplitude du champ électrique et du champ magnétique, ce qui, dans la pratique peut s'avérer très difficile.

### 2.1.3.1 Densité de puissance et champ

Il n'est pas facile de déterminer le vecteur de Poynting dans la région de champ proche en raison de la relation de phase et d'amplitude arbitraire dont on vient de parler. Il faut mesurer ou calculer séparément en chaque point les amplitudes  $E$  et  $H$  ainsi que leur relation de phase, ce qui rend la tâche particulièrement complexe et longue.

En utilisant des formules analytiques, on ne peut faire une estimation du champ dans la région de champ proche que pour des éléments rayonnants parfaits simples comme une antenne doublet élémentaire. Dans le cas de systèmes d'antennes plus complexes, il faut utiliser d'autres techniques mathématiques pour estimer les niveaux du champ dans la région de champ proche. Ces autres techniques permettent de faire des estimations relativement précises du champ, de la densité de puissance et d'autres caractéristiques utiles du champ, même dans la région de champ proche qui est complexe.

Il est encore plus difficile de faire des mesures du champ dans la région de champ proche étant donné qu'il n'existe aucune méthode d'étalonnage pouvant servir de référence. La Commission électrotechnique internationale travaille actuellement à l'élaboration d'une norme sur les mesures du champ électromagnétique aux fréquences comprises entre 9 kHz et 300 GHz, en particulier dans la région de champ proche [1]. En outre, la Norme EN 61566 (Mesures d'exposition aux champs électromagnétiques à radiofréquence – intensité du champ dans la gamme de fréquences 1 kHz-1 GHz, § 6.1.4) donne davantage d'informations sur ce sujet.

### 2.1.4 Polarisation

La polarisation est définie comme étant la direction du vecteur champ électrique rapportée au sens de propagation du front de l'onde.

En radiodiffusion, on utilise différents types de polarisation, essentiellement la polarisation verticale et la polarisation horizontale (par rapport à un front d'onde se déplaçant parallèlement à la surface de la Terre) mais il y a d'autres types de polarisation, par exemple la polarisation oblique et la polarisation elliptique.

### 2.1.5 Modulation

La modulation est une caractéristique très particulière de l'émission d'un émetteur de radiodiffusion. Étant donné que certains effets des rayonnements électromagnétiques dépendent du type de modulation utilisé il s'ensuit qu'il faut tenir compte de la modulation lors des évaluations de sécurité. Il faut également tenir compte de la modulation lorsqu'on effectue des mesures ou des calculs pour déterminer si les limites sont dépassées.

La modulation se traduit souvent par une variation du signal en amplitude et en fréquence. C'est la raison pour laquelle on a généralement besoin de faire une moyenne temporelle pour déterminer les valeurs à utiliser dans les mesures et les calculs. Cette exigence est elle aussi reconnue dans les différentes normes.

#### 2.1.5.1 Caractéristiques d'une émission radioélectrique

Le Règlement des radiocommunications (RR) de l'UIT classe les émissions des émetteurs radioélectriques en fonction de la largeur de bande requise ainsi que des caractéristiques fondamentales ou facultatives de la transmission. La classification complète comprend les neuf caractères suivants:

- les caractères 1 à 4 décrivent la largeur de bande (trois chiffres et une lettre);
- les caractères 5 à 7 décrivent les caractéristiques fondamentales (deux lettres et un chiffre);
- les caractères 8 et 9 décrivent les caractéristiques facultatives (deux lettres).

Seules les trois caractéristiques fondamentales interviennent pour l'examen des questions touchant à la sécurité radioélectrique. Il s'agit des paramètres suivants:

- le type de modulation de la porteuse principale Caractère 5
- la nature du ou des signaux qui modulent la porteuse principale Caractère 6
- le type d'information à transmettre Caractère 7

Le Tableau 2 qui est basé sur les informations données dans le RR récapitule les divers caractères qui sont utilisés pour classer les trois caractéristiques fondamentales d'une émission radioélectrique. Pour la radiodiffusion sonore et la radiodiffusion télévisuelle, les caractères pertinents sont les suivants:

- radiodiffusion MA (ondes kilométriques, ondes hectométriques et ondes décamétriques, double bande latérale) A3E
- radiodiffusion MA (ondes décamétriques bande latérale unique (BLU), réduction de la porteuse/porteuse variable) R3E
- radiodiffusion MA (ondes décamétriques bande latérale unique, suppression de la porteuse) J3E
- images de télévision C3F
- signaux sonores de télévision F3E ou A3E
- radiodiffusion MF F3E ou F9E
- radiodiffusion vidéo numérique (DVB) G7F
- radiodiffusion audio numérique (DAB) G7E

TABLEAU 2

**Caractères utilisés pour définir la classe d'émission sur la base des informations données dans le RR**

<b>Caractère 5 Type de modulation de la porteuse principale</b>		<b>Caractère 6 Nature du signal/des signaux modulant la porteuse principale</b>		<b>Caractère 7 Type d'information à transmettre</b>	
N	Non modulé	0	Pas de signal de modulation	N	Pas d'information transmise
A	Modulation d'amplitude: double bande latérale	1	Canal unique contenant: des informations quantifiées ou numériques n'utilisant pas une sous-porteuse de modulation	A	Télégraphie pour réception auditive
H	Modulation d'amplitude: bande latérale unique, porteuse complète	2	Canal unique contenant: des informations quantifiées ou numériques utilisant une sous-porteuse de modulation	B	Télégraphie pour réception automatique
R	Modulation d'amplitude: bande latérale unique, réduction du niveau de la porteuse ou porteuse de niveau variable	3	Canal unique contenant: des informations analogiques	C	Télécopie
J	Modulation d'amplitude: bande latérale unique, suppression de la porteuse	7	Deux ou plus de deux canaux comprenant: des informations quantifiées ou numériques	D	Transmission de données, télémesure et télécommande

TABLEAU 2 (*fin*)

Caractère 5 Type de modulation de la porteuse principale		Caractère 6 Nature du signal/des signaux modulant la porteuse principale		Caractère 7 Type d'information à transmettre	
B	Modulation d'amplitude: bandes latérales indépendantes	8	Deux ou plus de deux canaux comprenant: des informations analogiques	E	Téléphonie, y compris radiodiffusion sonore
C	Modulation d'amplitude: bande latérale résiduelle	9	Deux ou plus de deux canaux comprenant: un mélange de canaux analogiques et numériques	F	Télévision (vidéo)
F	Modulation angulaire: fréquence (par exemple, MF)	X	Cas autrement non couverts	W	Combinaison des éléments ci-dessus
G	Modulation angulaire: phase			X	Cas autrement non couverts
D	Mélange de modulation d'amplitude et de modulation angulaire (simultanément ou séquentiellement)				
P	Séquence d'impulsions: non modulée				
K	Séquence d'impulsions: modulée en amplitude				
L	Séquence d'impulsions: modulée en largeur et en durée				
M	Séquence d'impulsions: modulée en position et en phase				
Q	Séquence d'impulsions: modulation angulaire de la porteuse pendant la période de l'impulsion				
V	Séquence d'impulsions: combinaison de K, L, M et Q, ou autres moyens				
W	Cas non couverts ci-dessus: porteuse modulée par deux ou plus de deux modes (amplitude, angle, impulsion)				
X	Cas non couverts				

### 2.1.5.2 Exprimer la puissance de l'émetteur et le champ en termes de type de modulation

On peut obtenir auprès des personnes responsables du fonctionnement de l'émetteur sur un site particulier des informations sur la puissance fournie à l'antenne et sur le type de modulation. Il est en effet important de savoir si la puissance de l'émetteur est exprimée en termes de puissance de la porteuse  $P_c$ , de puissance moyenne,  $P_m$ , ou de puissance de crête  $P_p$ , afin de pouvoir comparer avec exactitude les valeurs calculées ou les valeurs mesurées avec les niveaux dérivés.



TABLEAU 3a (*fin*)

Classe d'émission (caractéristiques fondamentales) <sup>(1), (2)</sup>	Type de puissance connue								
	Puissance de la porteuse, $P_c$			Puissance moyenne, $P_m$			Puissance de crête, $P_p$		
	Facteur pour déterminer:			Facteur pour déterminer:			Facteur pour déterminer:		
	$P_c$	$P_m$	$P_p$	$P_c$	$P_m$	$P_p$	$P_c$	$P_m$	$P_p$
C*F <sup>(4)</sup>									
Modulation négative	–	–	–	–	1	1,85	–	0,54	1
Modulation positive					1	1,42		0,87	1
F*... <sup>(5)</sup>	1	1	1	1	1	1	1	1	1
H*A									
H*B	1	2	4	0,5	1	2	0,25	0,5	1
H*E									
J*B <sup>(3)</sup>									
J*C <sup>(3)</sup>	–	–	–	0	1	1	0	1	1
J*E <sup>(3)</sup>									
K*A									
K*E	1	1,5	4/d	0,67	1	2,67/d	0,25d	0,38d	1
L*A									
L*E									
M*A	1	1	1/d	1	1	1/d	d	d	1
H*E									
P*N									
R*B <sup>(3)</sup>									
R*C <sup>(3)</sup>	–	–	–	–	1	1	–	1	1
R*E <sup>(3)</sup>									
G7E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1

<sup>(1)</sup> Voir le Tableau 2 pour tout complément d'information sur le code à 3 symboles qui est utilisé pour décrire les trois caractéristiques fondamentales d'un type de transmission.

<sup>(2)</sup> Un \* indique que la deuxième caractéristique (c'est-à-dire la nature du signal de modulation) n'est pas pertinente dans l'examen des risques.

<sup>(3)</sup> On se place dans l'hypothèse où la porteuse est presque totalement supprimée et où, dans le cas d'une modulation avec tonalité, la puissance de crête de l'émetteur peut être atteinte dans une BLU.

<sup>(4)</sup> La puissance de la porteuse,  $P_c$ , n'est pas clairement définie.

<sup>(5)</sup> La troisième caractéristique n'est pas pertinente pour l'examen des risques.

$d$  = facteur d'utilisation d'une suite d'impulsions.

Ces facteurs sont donnés pour la DAB et la DVB lorsque la puissance est mesurée sur l'ensemble du canal (en général, 1,5 MHz pour la DAB et 8 MHz pour la DVB).

TABLEAU 3b

**Relation entre puissance de la porteuse, puissance moyenne, puissance de crête et puissance instantanée maximale pour différentes classes d'émission (cas type de modulation)**

Classe d'émission (caractéristiques fondamentales)	Type de puissance connu								
	Puissance de la porteuse, $P_c$			Puissance moyenne, $P_m$			Puissance de crête, $P_p$		
	Facteur pour la détermination de			Facteur pour la détermination de			Facteur pour la détermination de		
	$P_c$	$P_m$	$P_p$	$P_c$	$P_m$	$P_p$	$P_c$	$P_m$	$P_p$
A*C (pour $m = 70\%$ )									
A*E (pour $m = 70\%$ )	1	1,25	4	0,67	1	2,67	0,25	0,38	1
C*F <sup>(1)</sup>									
Modulation négative	–	–	–	–	1	4,34	–	0,23	1
Modulation positive	–	–	–	–	1	2,7	–	0,37	1
F*...	1	1	1	1	1	1	1	1	1

<sup>(1)</sup> La puissance de la porteuse,  $P_c$ , n'est pas clairement définie.

Le Tableau 3b peut également servir à convertir et exprimer les valeurs du champ dans d'autres notations; à noter toutefois que la racine carrée des facteurs de conversion donnés dans le Tableau 3b doit être utilisée lorsqu'il s'agit de champs. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus d'une émission radio MA, la valeur efficace du champ pour la porteuse uniquement devrait être multipliée par  $\sqrt{1,5}$  (ou  $\sqrt{1,25}$ ) pour obtenir la valeur efficace du champ tenant compte des composantes de modulation. Inversement, le niveau dérivé (tenant compte des composantes de modulation) devrait être divisé par  $\sqrt{1,5}$  (ou  $\sqrt{1,25}$ ) pour obtenir un niveau dérivé équivalent pour la porteuse uniquement.

La valeur efficace du champ dans la région de champ lointain peut être calculée à partir de la puissance connue, à l'aide de l'équation (7); le type de puissance à utiliser ( $P_m$ , ou  $P_p$ ) est donné dans le Tableau 4.

TABLEAU 4

**Relation entre certaines notations du champ et certaines notations de la puissance**

Pour calculer	Puissance utilisée exprimée comme
La valeur effective du champ équivalent	Puissance moyenne de l'émetteur $P_m$
La valeur moyenne du champ équivalent qui se produit pendant une période d'oscillation RF crête	Puissance de crête $P_p$
La valeur de crête (maximale) du champ équivalent	Puissance de crête $P_p^{(1)}$

<sup>(1)</sup> La valeur de crête du champ équivalent est déterminée à partir de la puissance de crête,  $P_p$ , en utilisant le facteur de correction valeur de crête/valeur efficace. Ce facteur est de 21/2 pour une porteuse sinusoïdale.

### 2.1.6 Diagrammes de brouillage

Les structures naturelles ou artificielles peuvent rerayonner un champ électromagnétique. Ce champ rerayonné s'ajoute vectoriellement au champ direct, ce qui peut se traduire par des diagrammes de brouillage qui se composent des maxima et des minima localisés du champ. Le diagramme de brouillage est encore plus complexe s'il y a plusieurs rerayonnements du champ.

Les diagrammes de brouillage dépendent de la fréquence de la source de rayonnement. Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est courte et donc plus proches spatialement sont les maxima et les minima. Aux fréquences des ondes décimétriques attribuées à la télévision, les maxima et les minima locaux peuvent être séparés de quelques dixièmes de centimètres seulement.

Plusieurs diagrammes se chevauchent en présence de sources de rayonnement multiples, par exemple lorsque plusieurs canaux de radio et de télévision sont rayonnés depuis le même site.

## 2.2 Niveaux du champ à proximité d'antennes de radiodiffusion

Les niveaux du champ relevés à proximité d'antennes de radiodiffusion types en ondes kilométriques/hectométriques, décamétriques, métriques et décimétriques sont examinés dans le présent paragraphe.

### 2.2.1 Bandes des ondes kilométriques/hectométriques (150-1 605 kHz)

Dans les bandes des ondes kilométriques/hectométriques les fréquences sont au-dessous des fréquences de résonance du corps. Dans le cas des effets directs, les niveaux limites (également appelés niveaux «dérivés») pour les valeurs du champ électrique, E, et du champ magnétique, H, sont relativement élevés; dans de nombreux cas, les valeurs ne sont élevées qu'à proximité immédiate de l'antenne. Cela est particulièrement vrai aux fréquences inférieures des bandes d'ondes kilométriques/hectométriques et pour les normes/lignes directrices qui ont spécifié des niveaux dérivés plus élevés. A l'extrémité supérieure de la bande, toutefois, les distances peuvent être allongées de quelques centaines de mètres. Il faut bien comprendre que cette augmentation de la distance est due, en partie du moins, à la réduction des niveaux de référence observés à l'extrémité supérieure de la bande des ondes hectométriques. Pendant les transmissions, tout accès au mât/à la tour doit être évité en raison des champs élevés et des risques de choc électrique.

### 2.2.2 Bandes des ondes décamétriques (3-30 MHz)

Des mesures font apparaître que, dans des zones étendues autour d'une station d'émission de forte puissance fonctionnant en ondes décamétriques, la valeur du champ électromagnétique dépassera les niveaux dérivés du champ électrique, en particulier à proximité des lignes d'alimentation en fils nus. Dans de nombreuses stations de radiodiffusion, ces lignes d'alimentation sont maintenant enterrées pour réduire le champ, mais cela est impossible autour des réseaux d'antennes proprement dits. Il faudra donc définir autour de ces réseaux d'antennes des «zones d'exclusion» et les opérations de maintenance devront être programmées en dehors des plages où le système d'antenne émet, ce qui sera difficile dans de nombreuses stations en ondes décamétriques où, pour des raisons de programmation, les diagrammes de champ peuvent changer toutes les 15 min. Le champ mesuré devant un réseau d'antennes fonctionnant en ondes décamétriques a tendance à augmenter avec la

hauteur de l'antenne au-dessus du sol. Cela s'explique, en partie, par l'angle d'élévation du faisceau principal, compris entre 10 et 15° environ, mais la principale raison, ce sont les conditions limites à la surface du sol. La plupart des antennes de radiodiffusion en ondes décimétriques sont à polarisation horizontale, et dans ce cas le champ électrique mesuré au niveau du sol serait égal à zéro dans l'hypothèse d'une conductivité infinie du sol. Dans la pratique toutefois, la conductivité du sol étant finie, la composante horizontale du champ électrique est faible.

Il importe de bien comprendre que le champ proche d'un réseau d'antennes en ondes décimétriques peut s'étendre sur des distances très importantes, non seulement en raison des dimensions des antennes mais aussi parce que, du fait de l'irrégularité du terrain, l'ouverture équivalente du réseau d'antennes est très grande. Les valeurs du champ mesurées sont inférieures aux niveaux dérivés relevés à proximité du réseau d'antennes et ces valeurs augmentent de nouveau, plus on s'éloigne de l'antenne. Toutefois, dès que l'on entre dans la région de champ proche, les niveaux du champ diminuent de nouveau plus on s'éloigne du réseau d'antennes.

### 2.2.3 Bandes des ondes métriques/décimétriques

En règle générale, sur les sites des stations de forte puissance fonctionnant en ondes métriques/décimétriques, les antennes sont montées sur des mâts ou des pylônes non haubanés, à environ 100 m au-dessus du niveau du sol. Au niveau du sol, les valeurs du champ sont donc relativement faibles, en raison de la distance par rapport à l'antenne et aussi de la faible ouverture du faisceau transmis dans le plan vertical.

### 2.2.4 Bande des ondes centimétriques (3-30 GHz), (0,1-1 m)

Cette bande de fréquences est utilisée pour un nombre considérable de systèmes de télécommunication, par exemple les systèmes hertziens fixes ou mobiles point à point ou point-multipoint, les systèmes de radiodiffusion par satellite, les radars militaires ou civils, les stations terriennes en liaison montante, etc.

Les systèmes utilisés en radiodiffusion sont examinés dans les paragraphes qui suivent.

#### 2.2.4.1 Définitions des zones de champ

Pour des antennes paraboliques dont le diamètre,  $D$ , est très supérieur à  $\lambda$ , on utilise les définitions suivantes:

*Région de champ proche* – Dans la région de champ proche, ou région de Fresnel, du faisceau principal, la densité de puissance peut atteindre un maximum avant de commencer à décroître avec la distance. La valeur maximale de la densité de puissance dans l'axe, dans la région de champ proche, dépend uniquement de la puissance fournie à l'antenne, du diamètre,  $D$ , de cette antenne et de l'efficacité de l'antenne.

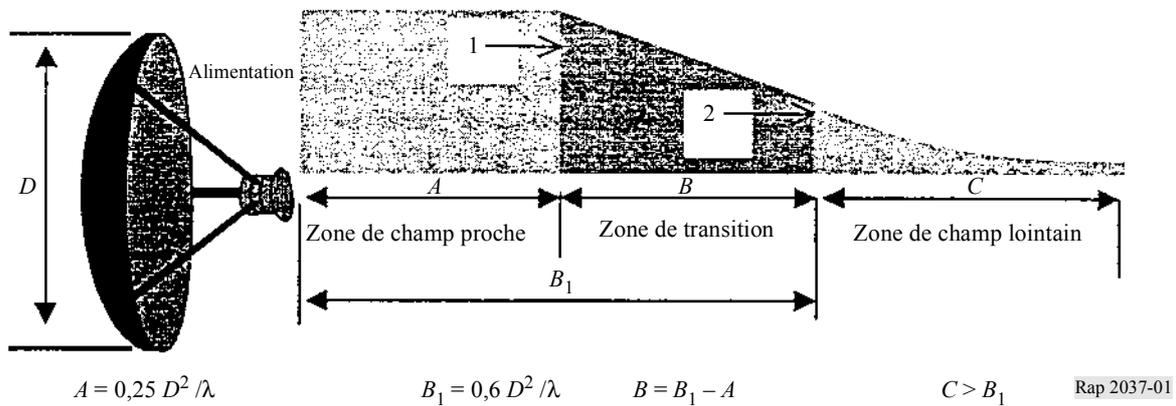
*Région de transition* – La densité de puissance dans la région de transition décroît de façon inversement proportionnelle à la distance par rapport à l'antenne.

*Région de champ lointain* – La densité de puissance dans la région de champ lointain, ou région de Fraunhofer, d'une antenne décroît de façon inversement proportionnelle au carré de la distance.

Les diverses zones pour une antenne parabolique sont illustrées dans la Fig. 1. La méthode ci-après n'est valable que le long de l'axe principal de l'antenne.

FIGURE 1

## Densité de puissance d'une antenne parabolique sur l'axe de la parabole



Une antenne parabolique rayonne dans l'ensemble de la zone de champ proche sous forme d'un cylindre de diamètre,  $D$ . La valeur maximale du champ électromagnétique et la densité de puissance associée sont constantes dans toute la zone de champ proche.

Elle est donnée par l'équation suivante:

$$S(\text{W/m}^2) = \frac{16\eta P}{\pi D^2}$$

où:

- $\eta$ : efficacité de l'antenne parabolique (on utilise une valeur de 0,55)
- $P$ : puissance de l'émetteur (W)
- $D$ : diamètre de l'antenne parabolique (m).

Il est à noter que la densité,  $S$ , est maximale sur l'ensemble de la zone de champ proche.

Depuis un point 1 (début de la zone de transition), la densité,  $S$ , décroît linéairement en fonction de la distance  $r$  jusqu'à un point 2, début de la zone de champ proche.

Dans la zone de champ lointain,  $S$  décroît de façon inversement proportionnelle au carré de la distance, selon l'équation:

$$S(\text{W/m}^2) = \frac{G P}{4\pi r^2}$$

où:

- $G$ : gain de l'antenne parabolique rapporté à une source isotrope
- $r$ : distance par rapport à l'antenne parabolique (m).

La densité  $S$  est maximale sur l'axe de l'antenne parabolique.

#### 2.2.4.2 Liaisons hertziennes de Terre fixes ou mobiles

Un système d'émission-réception type se compose d'un émetteur-récepteur, d'un guide d'ondes et d'une antenne parabolique d'émission-réception. La puissance de l'émetteur est comprise entre 0,1 W et 15 W et le diamètre de l'antenne parabolique entre 0,5 m et 4 m, selon la bande de fréquences utilisée.

Le gain de l'antenne parabolique est habituellement compris entre 30 et 50 dB.

### 2.2.4.3 Stations terriennes de satellite

L'emplacement idéal pour une station terrienne de satellite est un terrain plat de basse altitude ou une vallée située loin de tout bâtiment ou de zones industrielles. Dans la pratique toutefois, ces stations sont souvent situées en zones urbaines, montées sur les toits de bâtiments, etc.

En général, l'angle d'élévation du faisceau principal est compris entre 5 et 50°; le diamètre de l'antenne est habituellement de 15 m au maximum, même s'il y a quelques exemples, peu nombreux, de paraboles plus larges.

Dans la zone de champ proche, le niveau du champ des liaisons de Terre fixes ou mobiles peut dépasser les niveaux de référence, en particulier lorsque les stations sont des stations de forte puissance. Par conséquent, il faut éviter physiquement que des personnes non autorisées aient accès directement à ces sites. Les niveaux de référence peuvent également être dépassés dans la zone de transition.

En particulier, les stations terriennes de satellite de forte puissance peuvent, pour un grand nombre d'entre elles, rayonner un champ dont la valeur dépasse les niveaux recommandés dans la zone de champ proche et dans la zone de transition. Etant donné que ces zones peuvent être relativement étendues, il faut choisir avec soin l'emplacement de la station terrienne de satellite. Etant donné que le rayonnement est émis à un certain angle d'élévation, il faut également prévoir des mécanismes de sécurité de façon à éviter mécaniquement toute modification de l'angle d'élévation et de se retrouver dans une situation où la station rayonnerait dans un espace où il pourrait y avoir une présence humaine.

## 2.3 Champ de fréquence mixte

Il est très fréquent d'avoir plusieurs émetteurs (fonctionnant sur des fréquences différentes) situés sur le même site. Dans ce cas, il faut tenir compte de l'effet (combiné) de tous ces émetteurs sur l'exposition de l'homme aux rayonnements radiofréquences. Par ailleurs, cet effet dépend de la fréquence et, par conséquent, une fois calculés les paramètres pertinents ( $S$ ,  $E$  et  $H$ ), il faut tenir compte de l'effet combiné.

Pour l'effet thermique, les limites d'exposition sont données en termes de taux ou de débit d'absorption spécifique (SAR, *specific absorption rate*) (voir l'Appendice 4). Il convient de déterminer les densités de puissance appropriées. Dans le cas d'un émetteur multifréquences, il est recommandé que la densité de puissance totale soit la somme des densités de puissance à chaque fréquence d'émission:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i \quad (11)$$

où  $S_i$  est la densité de puissance à la fréquence  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) avec la condition que:

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \quad (12)$$

où  $L_i$  est le niveau de référence de la densité de puissance à la fréquence  $f_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Il s'agit là du principe de base mais il y a quelques différences dans son application (voir l'Appendice 4).

## 2.4 Champs électromagnétiques à l'intérieur de bâtiments

Les matériaux du bâtiment et l'infrastructure à l'intérieur du bâtiment influent beaucoup sur les champs électromagnétiques: ils font varier le champ résultant, d'un point à un autre, même à l'intérieur d'une même pièce. Les variations spatiales du champ électromagnétique sont dues aux réflexions multiples de l'onde incidence et, par conséquent, la polarisation du champ résultant peut être différente de celle de l'onde incidente.

Les objets métalliques et les conduits (lignes et tubes), à l'origine d'un «rerayonnement» (agissant comme une source secondaire) peuvent modifier l'intensité du champ à leur proximité.

Toutes ces conditions font qu'il est très difficile d'évaluer l'exposition. Il faut tenir compte d'un nombre relativement important de paramètres lorsqu'on effectue des calculs ou des mesures.

Pour calculer les limites d'exposition avec une précision acceptable, il faut choisir un modèle approprié de représentation de l'environnement.

La précision des mesures dépend des dimensions et de la bande de détection de la sonde ainsi que de l'emplacement de la personne qui effectue les mesures par rapport à la source de rayonnement et à la sonde.

Il n'y a pas encore de normes internationales relatives à une méthode de calcul ou de mesure.

Le problème n'est pas simplement la valeur des limites d'exposition mais la façon dont les calculs et les mesures devraient être effectuées et c'est là le principal objectif de ce Rapport.

## 3 Calculs

### 3.1 Procédures

Les méthodes de calcul analytiques ou numériques permettent de prévoir les valeurs du champ externe ou du champ interne produit par un élément rayonnant électromagnétique. Les calculs sont utiles pour estimer le niveau du champ dans certaines conditions d'exposition afin de déterminer si des mesures sont nécessaires et quel équipement il convient d'utiliser. Les calculs peuvent aussi compléter les mesures et servir à vérifier que les résultats des mesures sont raisonnables.

Dans certaines situations, par exemple dans des conditions complexes d'exposition au champ proche pour lesquelles on ne dispose pas d'équipements de mesure du taux SAR très coûteux, les calculs peuvent remplacer les mesures.

La précision et la qualité des calculs dépendront de la méthode analytique ou numérique utilisée ainsi que de la précision de la description de la ou des sources électromagnétiques et des objets physiques situés entre l'élément rayonnant et le point où sont effectuées les prévisions susceptibles d'avoir une influence sur les valeurs du champ. Pour les calculs du taux SAR, la précision du modèle corporel aura elle aussi une influence sur la qualité des résultats.

Pour pouvoir faire un calcul, il faut connaître ou avoir estimé les paramètres source.

La fréquence, la puissance moyenne, la puissance de crête, la largeur de l'impulsion, la longueur de l'impulsion, le taux de répétition des impulsions et le diagramme d'antenne sont des exemples de tels paramètres.

#### 3.1.1 Solutions en boucle fermée

Dans la région de champ proche d'une source d'émission, où les champs électromagnétiques présentent essentiellement la forme d'une onde plane, on peut utiliser des expressions analytiques

pour estimer les valeurs du champ. Dans la direction principale de rayonnement d'une antenne, on peut utiliser l'équation de Friis en espace libre pour calculer la densité de puissance:

$$S = \frac{P G}{4\pi d^2}$$

où:

$S$ : densité de puissance (W/m<sup>2</sup>)

$P$ : puissance moyenne en sortie (W)

$G$ : gain d'antenne dans la région de champ lointain rapporté à un élément rayonnant isotrope

$d$ : distance par rapport à l'élément rayonnant (m).

La relation entre la densité de puissance et les champs électrique et magnétique est donnée par l'équation suivante:

$$S = \frac{E^2}{\eta} = H^2 \eta$$

où:

$E$ : champ électrique (V/m) (valeur efficace)

$H$ : champ magnétique (A/m) (valeur efficace)

$\eta$ : impédance intrinsèque de l'espace libre, égale à 377  $\Omega$ .

Par conséquent, on peut calculer à l'aide des formules ci-dessus les valeurs des champs:

$$E = \sqrt{\frac{P G \eta}{4\pi d^2}} = \frac{5,5\sqrt{P G}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{P G}{4\pi d^2 \eta}} = \frac{\sqrt{P G}}{68,8 d}$$

Ces relations ne sont valables que dans la région de champ proche de la source de rayonnement c'est-à-dire lorsque  $d > 2D^2/\lambda$ , où  $D$  est la dimension la plus grande de la structure rayonnante et  $\lambda$  est la longueur d'onde. L'affaiblissement ou l'augmentation du champ dû à la réflexion, à la transmission dans les matériaux et à la diffraction ne sont pas pris en compte. L'utilisation de ces relations dans la région de champ proche ou dans des directions autres que la direction principale du rayonnement donnera en règle générale des valeurs trop importantes, à moins d'introduire un facteur de correction pour le champ proche ou un facteur pour le diagramme de rayonnement.

### 3.1.2 Procédures numériques

Les procédures analytiques ne peuvent être utilisées que pour calculer les propriétés électromagnétiques du champ et ce dans un petit nombre de cas et de géométries particuliers. Pour résoudre les problèmes d'ordre général, il faut utiliser des techniques numériques. Les techniques numériques les plus couramment utilisées pour calculer les champs électromagnétiques rayonnés par une source d'émission ou les champs internes ainsi que le taux d'absorption spécifique dans des corps biologiques sont énumérées ci-après. La technique numérique la mieux adaptée à tel ou tel problème dépendra de la gamme de fréquences considérée, des structures géométriques à modéliser et de la situation d'exposition type (champ proche ou champ lointain).

Certaines méthodes de modélisation numériques courantes sont indiquées ci-après:

- Optique physique
- Théorie physique de la diffraction
- Optique géométrique
- Théorie géométrique de la diffraction
- Théorie uniforme de la diffraction
- Méthode des courants équivalents
- Méthode des moments (MOM, *method of moments*)
- Méthode des multipôles multiples (MMP, *multiple multipole method*)
- Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD, *finite-difference time-domain method*).
- Méthode des éléments finis (FEM, *finite element method*)
- Méthode des impédances.

Pour chaque application il faut procéder à une évaluation pour déterminer laquelle des méthodes ci-dessus est la mieux adaptée pour résoudre un problème donné.

Chacune de ces méthodes permet de déterminer l'amplitude et la phase des grandeurs suivantes du champ électromagnétique en tout point de l'espace, lorsque les éléments rayonnants et diffusants peuvent être des conducteurs idéaux ou des corps diélectriques:

- champ électrique;
- champ magnétique;
- densité de puissance;
- courant;
- tension;
- impédance.

### **Méthode des moments (MOM)**

La méthode des moments est souvent utilisée dans la conception des systèmes d'antenne de radiodiffusion (puissance de l'émetteur en sortie, gain d'antenne, etc.) et dans le calcul des champs électromagnétiques résultants. Elle permet d'effectuer les calculs aux bornes d'émission et de réception ainsi que dans la région de champ proche et la région de champ lointain de l'antenne.

Il est possible de modéliser des structures techniques au plus tridimensionnelles, en tenant compte des paramètres propres aux matériaux (constante diélectrique complexe) ainsi que des paramètres du sol. La modélisation se fait à l'aide de fils de diamètre fin par rapport à la longueur d'onde et permet, en principe, de représenter également des surfaces. La limitation de cette méthode tient au fait que la modélisation de structures étendues et complexes peut devenir trop lourde, en termes de temps – et de mémoire – pour l'ordinateur.

La méthode des moments est une technique qui a été largement utilisée pour résoudre des problèmes électromagnétiques et calculer le taux SAR avec une modélisation par blocs de corps biologiques. Dans cette méthode, on calcule les champs électriques à l'intérieur d'un corps biologique en résolvant les équations intégrales de Maxwell à l'aide d'une fonction de Green.

### **Méthode de la transformée rapide de Fourier/du gradient conjugué (FFT/CG)**

La méthode FFT/CG est un prolongement de la méthode des moments. On utilise des algorithmes itératifs basés sur la transformée rapide de Fourier et sur la méthode du gradient pour résoudre des équations linéaires établies à partir de la méthode des moments.

### **Méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD)**

La méthode FDTD est une méthode numérique permettant de résoudre les équations différentielles de Maxwell dans le domaine temporel. Elle peut servir à calculer les champs électromagnétiques internes et externes et la distribution du taux SAR dans des corps biologiques exposés à un champ proche ou à un champ lointain. Dans la méthode FDTD, il y a une discrétisation dans le domaine temporel et dans le domaine spatial et la modélisation d'un corps biologique se fait par attribution des valeurs de permittivité et de conductivité aux cellules spatiales que ce corps occupe. La mémoire informatique nécessaire est proportionnelle au nombre de cellules spatiales. On considère que la méthode FDTD est la méthode la plus prometteuse pour ce qui est du calcul du taux SAR mais pour des calculs précis on a besoin d'ordinateurs très puissants.

### **Méthode des multipoles multiples (MMP)**

La méthode MMP est basée sur des solutions analytiques à des équations du champ qui ont un multipole en un point de l'espace et elle est utilisée avec la méthode des multipoles généralisée (GMP). La méthode MMP est tout particulièrement indiquée pour la simulation de corps dits «à fort affaiblissement par diffusion» qui sont situés à proximité des sources de rayonnement, c'est-à-dire dans la région de champ proche immédiate.

### **Méthode des impédances**

La méthode des impédances a été utilisée avec de bons résultats pour résoudre des problèmes dosimétriques pour lesquels il est possible de faire des approximations quasi statiques. Cette méthode a donné de très bons résultats pour calculer les taux d'absorption spécifique dans des corps humains, pour des fréquences allant jusqu'à 40 MHz. Dans la méthode des impédances, le corps biologique est modélisé par un réseau tridimensionnel d'impédances complexes.

#### **3.1.2.1 Calculs du champ**

La plupart des méthodes susmentionnées peuvent être utilisées pour calculer les niveaux du champ produit par des éléments rayonnants électromagnétiques. La précision des résultats dépend beaucoup de la qualité de modélisation de l'élément rayonnant (l'antenne par exemple). Si des objets situés à proximité de l'élément rayonnant, entre l'élément rayonnant et le point où est effectuée la prévision ou à proximité de ce point sont susceptibles d'avoir une forte incidence sur le niveau du champ, ces objets devraient eux aussi être modélisés.

#### **3.1.2.2 Calculs du taux d'absorption spécifique**

Etant donné qu'il est difficile de mesurer la valeur crête du taux SAR localisé ou la valeur moyenne du taux SAR corps entier dans de nombreuses conditions d'exposition, on peut utiliser les calculs de plusieurs des techniques numériques susmentionnées notamment la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), la méthode des moments (MOM) ou la méthode des multipoles multiples (MMP) pour faire une estimation de la distribution du taux d'absorption spécifique dans un corps biologique exposé aux rayonnements électromagnétiques du champ proche ou du champ lointain.

L'adéquation de telle ou telle méthode à un problème particulier dépend, par exemple, de la fréquence, des conditions d'exposition, de la taille de l'objet exposé, de la précision requise et du temps de calcul maximal tolérable. Pour chaque méthode, on a besoin d'avoir une expérience dans le domaine de la biophysique et de l'analyse numérique.

Pour utiliser l'un quelconque de ces modèles, on a besoin d'un modèle numérique géométrique tridimensionnel du corps ou de la partie du corps exposés. Les propriétés électriques à la fréquence d'exposition doivent être connues pour les différentes parties du corps. Selon la précision requise, on peut utiliser des modèles plus ou moins complexes. Dans certaines situations, des formes simples, par exemple des sphères ou des cylindres, suffisent pour modéliser le corps. Les propriétés diélectriques des tissus du corps humain sont bien documentées. En utilisant les images par résonance magnétique d'un corps humain, on peut élaborer des modèles numériques de corps humain très complexes et très précis. Des modèles par résonance magnétique avec différents types de tissus et une résolution spatiale de moins de quelques millimètres ont été utilisés pour calculer, selon la méthode FDTD, la distribution du taux d'absorption spécifique dans le corps d'êtres humains exposés aux champs électromagnétiques d'émetteurs radioportatifs.

## **4 Mesures**

### **4.1 Procédures**

Il convient de noter qu'en règle générale, les méthodes de mesure sont très importantes. Pour les mesures du champ proche, cela est encore plus vrai. Aux basses fréquences, la méthode de mesure est un problème très délicat et complexe, étant donné qu'habituellement la distance entre le point de mesure et la source de rayonnement est bien inférieure à la longueur d'onde. Pour cette raison, les fréquences entre 10 kHz et 30 GHz sont subdivisées en quatre grandes bandes pour la radio-diffusion: bandes des ondes kilométriques/hectométriques, bandes des ondes décamétriques, bandes des ondes métriques/décimétriques et bandes des ondes centimétriques.

#### **4.1.1 Bandes des ondes kilométriques/hectométriques**

Pour vérifier les résultats théoriques, les mesures du champ dans la zone de champ proche doivent être faites à l'aide d'instruments spéciaux (mesureurs de champ) avec trois doublets courts perpendiculaires les uns aux autres. Il est recommandé de ne pas utiliser un instrument ayant besoin d'un câble d'alimentation électrique.

Pour que la personne se servant de l'instrument de mesure ne perturbe pas la mesure, cet instrument doit être isolé. La distance entre l'instrument de mesure et l'opérateur devrait être déterminée de façon à ce que les éventuels mouvements de l'opérateur ne provoquent aucune modification sur l'échelle de l'instrument. Cette distance dépend de la fréquence du signal mesuré.

Pour effectuer ce type de mesure, il faut tenir compte de l'influence possible de tous les objets situés à proximité et, en particulier, de ceux qui seraient susceptibles d'être à l'origine d'effets de rerayonnement.

Lorsque les mesures ont pour objet de vérifier les résultats obtenus par un calcul théorique, les points de mesure devraient être choisis le long d'un rayon et à une hauteur comprise entre 1 et 2 m.

Des explications plus détaillées sont données dans la Recommandation UIT-R BS.1386.

#### **4.1.2 Bandes des ondes décamétriques**

Des explications détaillées sont données dans la Recommandation UIT-R BS.705.

#### **4.1.3 Bandes des ondes métriques/décimétriques**

Des explications détaillées sont données dans la Recommandation UIT-R BS.1195.

#### 4.1.4 Bandes des ondes centimétriques

Compte tenu de la longueur d'onde et des distances par rapport aux sources de rayonnement, il faut appliquer une méthode de mesure standard.

### 4.2 Instrumentation

#### 4.2.1 Introduction

Pour mesurer l'exposition au champ électromagnétique, entre 10 kHz et 300 GHz, il faut faire très attention à la variabilité spatiale et temporelle du champ à mesurer.

Pour ce faire, il faut utiliser des instruments adéquats et un dispositif de mesure valable.

Il est très important de connaître les caractéristiques des instruments de mesure car certains facteurs importants influent sur leur choix, par exemple, le champ électromagnétique par rapport à la fréquence ou ses harmoniques, les caractéristiques du champ (réactif ou rayonnant), le type de polarisation et la modulation, le nombre de sources de rayonnement.

L'exposition du corps humain aux champs électromagnétiques, à la densité de puissance ou à d'autres facteurs comme le courant induit font partie des problèmes les plus sérieux en matière de protection ou de contrôle que l'ingénieur doit résoudre. Dans de nombreux cas, il n'y a pas de rapport mathématique simple entre le champ électrique et le champ magnétique; par conséquent, en pareille situation, il faut effectuer des mesures distinctes pour chaque taille.

Les instruments de mesure à utiliser dans ce cas sont les suivants:

- des instruments spécifiques pour mesurer directement les paramètres des champs E ou H;
- des instruments pour mesurer la température.

##### 4.2.1.1 Généralités

L'instrumentation de base est la suivante:

- les sondes;
- les câbles de connexion qui acheminent le signal depuis la sonde jusqu'à l'unité de lecture ou de calcul;
- l'unité de lecture et l'unité de calcul.

##### 4.2.1.2 Sondes

La plupart des sondes sont isotropes ou équidirectives afin de mesurer l'énergie rayonnée depuis toutes les directions.

Les sondes doivent respecter les critères suivants:

- fournir un seul paramètre sans répondre aux parasites (les champs magnétiques H sont moins importants que les champs électriques E testés);
- les dimensions de la sonde sont très réduites, moins de  $\lambda/10$  de la fréquence maximale des valeurs testées;
- réagir à la variation des conditions environnementales.

Il est très important que la sonde isotrope soit, pendant la mesure, située perpendiculairement à la polarisation de l'antenne; dans cette configuration, il n'y a pas de couplage entre le support de la sonde et le champ électromagnétique rayonné par l'antenne. Cela est plus évident en cas de mesure de signaux en ondes moyennes.

### 4.2.1.3 Câbles

Les câbles utilisés pour connecter la sonde à l'instrument de lecture et de calcul doivent être exempts de bruit et il ne doit pas y avoir de couplage avec l'énergie produite par l'équipement sous essai, le circuit et l'unité de mesure.

Il est très important de noter que, par l'intermédiaire des câbles, le récepteur peut transmettre de la puissance radioélectrique aux instruments, ce qui peut fausser la lecture de la valeur.

Il est possible de résoudre ce problème en fixant les câbles pendant l'essai perpendiculairement à la source.

### 4.2.2 Caractéristiques des instruments de mesure du champ électrique et du champ magnétique

On mesure généralement l'exposition au champ magnétique dans le domaine fréquentiel. Il y a deux grands groupes d'instruments.

#### 4.2.2.1 Types d'instruments large bande et spécifications de ces instruments

Avec des instruments large bande (voir la Fig. 2), on peut mesurer le champ total dans une bande de fréquences donnée (largeur de bande, par exemple), mais il n'est pas possible de distinguer la contribution d'une source unique lorsque plusieurs sources rayonnent simultanément.

FIGURE 2  
Instruments large bande



Rap. 2037-02

Les instruments large bande sont constitués de capteurs qui peuvent être non isotropes pour mesurer une composante spatiale unique du champ ou isotropes pour mesurer toutes les composantes du champ simultanément. Ces instruments peuvent mesurer le niveau total du champ électromagnétique instantané ou bien la valeur efficace ou bien encore la valeur moyenne sur un intervalle de temps, en général six minutes, conformément aux dispositions réglementaires.

Les instruments large bande peuvent relever des catégories suivantes, en fonction de la caractéristique du transducteur utilisé:

- diode;
- bolomètre;
- coupleur thermique.

Ces instruments peuvent être utilisés pour le champ proche et pour le champ lointain.

### 4.2.3 Types d'instruments à bande étroite et spécifications de ces instruments

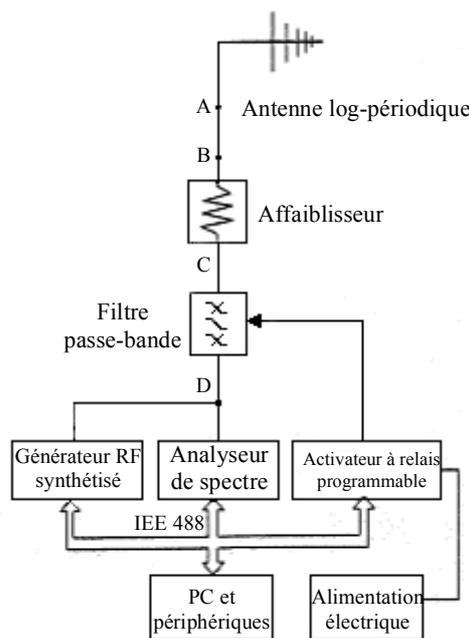
Les instruments à bande étroite sont sélectifs en fréquence et permettent de mesurer l'amplitude du champ électromagnétique à différentes fréquences. A l'aide d'un capteur ou d'antennes non isotropes, il est possible d'évaluer la direction et la polarisation du champ. Il faut prendre beaucoup de soin pour la mise en place du dispositif étant donné que le champ électromagnétique aux fréquences élevées varie rapidement dans l'espace, en particulier en présence d'objets réfléchissants comme les murs, la terre, les pylônes ou les structures métalliques. Il est important de noter que si l'on change le point de mesure, le champ détecté est complètement différent.

La mesure peut être influencée par la position de l'antenne et/ou les câbles de connexion.

Lorsque les mesures du champ électrique aux fréquences élevées se font dans le domaine temporel, il faut utiliser des instruments ayant des caractéristiques d'analyse appropriées (pour la réponse en fréquence et résolution) afin d'obtenir de bons résultats pour l'analyse spectrale par la transformée de Fourier.

La Fig. 3 donne le schéma fonctionnel des instruments de mesure à bande étroite.

FIGURE 3  
Schéma fonctionnel des instruments de mesure



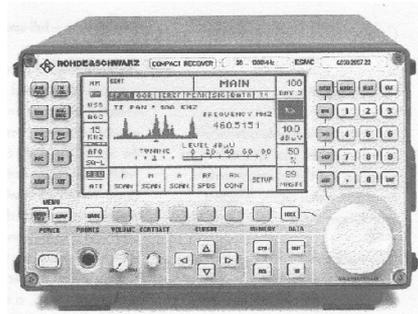
Rap. 2037-03

Ces instruments se composent des éléments fondamentaux suivants:

- Le capteur, ou plutôt l'antenne, qui mesure l'intensité du champ électrique E ou bien le champ magnétique H; pour E utiliser un doublet et pour H une boucle.
- Le transducteur qui transforme la réponse du capteur en une valeur proportionnelle de E ou de H.
- Le câble d'étalonnage et de connexion.

- Le récepteur sélectif (voir la Fig. 4) (qui mesure l'intensité du champ), à l'aide d'un circuit de syntonisation, affiche le signal sous forme d'une tension reçue à une fréquence choisie. L'analyseur de spectre indique sur l'écran de contrôle les valeurs de la tension ou de la puissance dans le domaine fréquentiel.

FIGURE 4

**Récepteur sélectif avec analyseur de spectre**

Rap. 2037-04

Il est très important d'être précis pendant ces mesures afin que les instruments de mesure ne perturbent pas le dispositif sous essai.

### 4.3 Comparaison entre les prévisions et les mesures

Il ressort d'une comparaison entre les prévisions et les mesures que les résultats des mesures concordent bien avec ceux obtenus par des calculs théoriques. Pour plus de renseignements, se reporter à l'Appendice 2.

## 5 Précautions à prendre au niveau des stations d'émission et à leur proximité

Le présent paragraphe décrit les précautions à prendre au niveau des stations d'émission de radio-diffusion de forte puissance pour limiter les risques éventuels liés aux rayonnements RF. Ces risques relèvent de deux grandes catégories, la première étant celle des risques directs pour la santé à la suite d'une exposition à des niveaux élevés de rayonnement RF (chocs, brûlures et éventuels dysfonctionnements d'implants médicaux, notamment) et la seconde étant celle des risques indirects lorsque des rayonnements RF peuvent être à l'origine d'explosions, de feux ou perturber le bon fonctionnement des machines, des grues, des véhicules, etc.

### 5.1 Précautions à prendre pour limiter les effets directs des rayonnements RF sur la santé

Deux groupes de personnes sont prises en considération pour ce qui est des précautions pouvant être raisonnablement prises. Le premier groupe est celui des employés qui travaillent dans les stations d'émission ou les visiteurs officiels qui s'y rendent régulièrement. Les risques qu'ils courent peuvent certes être plus fréquents mais il est beaucoup plus facile de prendre des mesures de précaution que pour le second groupe, à savoir le grand public.

## 5.1.1 Mesures de précaution pour les employés (travailleurs)

### 5.1.1.1 Mesures physiques

Il faut établir en quelque sorte un périmètre de sécurité pour restreindre l'accès à toute zone où les limites biologiques de base sont dépassées ou bien un contact avec des conducteurs radioélectriques exposés est possible. Il ne doit être possible d'accéder à ces zones qu'avec une clé ou un autre outil. Il faut prévoir un verrouillage mécanique ou électrique des enceintes auxquelles on doit pouvoir accéder pour des raisons de maintenance. Le contrôle des équipements doit être suffisamment efficace pour réduire le niveau des rayonnements radioélectriques.

Il faut utiliser d'autres mesures physiques, par exemple des signaux lumineux en plus, mais non en lieu et place, des barrières de protection.

Il faut réduire au strict minimum les risques de chocs ou de brûlures dus aux tensions RF induites sur des objets conducteurs (clôtures ou structures porteuses) en prévoyant une mise à la terre efficace et une maintenance adéquate. Il faut faire particulièrement attention à la mise à la terre des câbles temporaires ou des câbles métalliques comme les amorces de tirage, etc.

Lorsque de tels objets doivent être manipulés dans un champ RF, il faut prévoir une protection supplémentaire contre les chocs ou les brûlures (port de gants haute protection ou marquage approprié).

### 5.1.1.2 Procédures d'exploitation

Les évaluations des risques liés aux rayonnements RF doivent être réalisées par un personnel expérimenté ayant reçu une formation adéquate, à intervalles réguliers, et également chaque fois que des modifications importantes sont apportées à une station d'émission. Il faut tout d'abord identifier les éléments suivants:

- Les zones où des personnes risquent d'être exposées à des niveaux de rayonnement «dérivés» ou «d'investigation».
- Les différents groupes de personnes (employés, officiels qui se rendent sur le site, grand public, etc.), susceptibles d'être exposés.
- Les conséquences de dysfonctionnements, comme les fuites de brides, un mauvais alignement de l'antenne ou des erreurs d'exploitation.

Une première vérification des niveaux de rayonnement RF peut être faite par calcul ou par modélisation mathématique mais il faut également effectuer quelques mesures d'échantillonnage aux fins de vérification. Dans la plupart des cas, toutefois, il faudra effectuer des mesures pour déterminer plus précisément les niveaux des rayonnements RF. Les grandeurs effectives à mesurer (champ E, champ H, densité de puissance, courant induit) devraient être déterminées en fonction des circonstances particulières, notamment les fréquences des stations, la région du champ (champ proche, champ lointain) mesuré, la vérification de la conformité aux restrictions de base (taux SAR) ou uniquement aux niveaux «dérivés/d'investigation». Ces conditions détermineront également dans une large mesure s'il convient de mesurer séparément les trois composantes individuelles du champ ou d'utiliser un instrument isotrope. Des études des rayonnements RF devraient ensuite être réalisées par un personnel formé à l'utilisation de tels instruments, selon les procédures de mesure prescrites, et avec consignation des résultats dans un format bien précis.

Une personne compétente désignée devrait être responsable de l'identification et de la fourniture des types appropriés au sein de l'organisation ou de la société. De tels instruments de mesure doivent toujours être utilisés dans le respect des instructions du fabricant et être, à intervalles réguliers, testés et étalonnés. A l'issue de ces tests et de ces étalonnages, des étiquettes doivent être fixées sur

ces instruments pour indiquer les dates au-delà desquelles ils ne peuvent plus être utilisés. Il faut consigner les résultats des étalonnages et indiquer s'il a été nécessaire, à chaque occasion, d'apporter des corrections et/ou des réparations. Ces informations permettront ensuite de déterminer l'intervalle entre les étalonnages.

Lors de la mise en service des systèmes agréés, il faudra veiller à garantir le respect des limites des rayonnements RF et à minimiser l'exposition en termes de durée ou du nombre de personnes exposées. Chaque fois que cela est possible, les travaux de maintenance dans les zones soumises à des restrictions d'accès en raison des niveaux élevés des rayonnements RF devraient être programmés juste avant ou après les interruptions prévues de transmission ou lors des variations des diagrammes de rayonnement. Toutefois, il ne faut pas minimiser d'autres risques, par exemple le fait de travailler la nuit sur des pylônes, même illuminés. Si nécessaire, les émetteurs devraient fonctionner à puissance réduite ou être mis hors tension afin de sécuriser l'accès pour les travaux de maintenance ou de réparation.

Les zones interdites sur les sites des stations d'émission doivent être clairement délimitées et signalées et les systèmes «agréés» doivent être mis en œuvre. Des dispositions appropriées devraient être prises pour tous les systèmes, antennes, combineurs ou zones utilisés en partage par d'autres organisations. Toutes les personnes qui travaillent régulièrement dans des zones où les niveaux des rayonnements RF sont élevés devraient avoir une alarme personnelle ou un mesureur des risques de rayonnements RF.

Les expositions à des niveaux de rayonnements RF plus élevés que ceux spécifiés doivent être consignées. Les sociétés ou les organisations responsables de l'exploitation des stations d'émission devraient contrôler la santé des personnes qui travaillent régulièrement dans des zones où les niveaux des rayonnements sont élevés et participer, le cas échéant, à des études épidémiologiques.

Les modalités détaillées des politiques et procédures générales à suivre pour ce qui est de la sécurité en matière de rayonnements RF devraient être consignées dans des instructions de sécurité écrites et communiquées à l'ensemble du personnel concerné. Par ailleurs, des instructions devraient être publiées au niveau local pour chaque station d'émission afin d'assurer le respect des procédures et des politiques.

La formation dans le domaine de la sécurité devrait également porter sur la nature et les effets des rayonnements RF, les aspects médicaux et les normes de sécurité.

## **5.1.2 Mesures de précaution pour le public**

### **5.1.2.1 Mesures physiques**

Les mêmes considérations que celles exposées au § 5.1.1.1 pour les employés valent pour le public. Il convient d'accorder une attention toute particulière aux zones où les limites de rayonnements RF pourraient être dépassées en cas de dysfonctionnements. Des barrières de protection (clôture mise à la terre) devraient être mises en place si nécessaire. Il faudra vraisemblablement d'autres signaux pour prévenir des risques.

### **5.1.2.2 Procédures d'exploitation**

Dans les évaluations des risques dont il est question au § 5.1.1.2 il faut tenir compte du fait que certaines personnes peuvent avoir des implants médicaux. Il convient d'adopter une procédure pour donner à ces visiteurs potentiels des informations sur les risques pour leur santé. Cette procédure devrait être assortie des modalités relatives aux restrictions d'accès. Des instructions de base concernant la protection vis-à-vis des rayonnements RF devraient être fournies aux visiteurs qui se rendent régulièrement sur le site.

Il faut envisager de faire des études des rayonnements RF au-delà des limites du site, en particulier lorsque les tensions induites dans des structures métalliques extérieures (grues, ponts, bâtiments, etc.) peuvent être à l'origine de brûlures ou de chocs minimes. Pour effectuer ces études il convient de tenir compte du fait que le champ peut augmenter avec la distance, habituellement en raison d'un terrain en pente. Chaque fois que cela est nécessaire il convient de mettre en place un mécanisme de surveillance des applications de planification ou d'autres propositions de développement.

Un exemple est donné dans l'Appendice 3 (voir les Fig. 43 et 44).

## **5.2 Précautions à prendre pour se protéger contre les effets indirects des rayonnements RF**

Les effets indirects des rayonnements RF, par exemple les risques d'inflammation de substances inflammables, peuvent se produire à des niveaux bien inférieurs aux niveaux «dérivés/d'investigation», en particulier dans les bandes des ondes hectométriques et décamétriques car des substances inflammables peuvent être stockées sur un site où il y a des structures conductrices (par exemple, des tuyaux) qui pourraient constituer une antenne réceptrice assez efficace. Les risques réels sont toutefois rares mais peuvent concerner, entre autres, les usines de traitement industriel, les installations de stockage de carburant et les stations-service. Une évaluation détaillée est, cependant, loin d'être simple. La procédure générale recommandée ci-après se fonde par conséquent sur une élimination progressive. Les précautions détaillées qui ont été adoptées devront toutefois tenir compte des normes ou de la législation nationales en vigueur dans le pays concerné.

Il convient de procéder à une première évaluation, à partir d'estimations concrètes, pour le cas le plus défavorable, de la séparation minimale nécessaire entre un type particulier d'émetteur et une structure conductrice pour éviter un tel risque. La première chose à faire est de déterminer le champ minimal susceptible de constituer un risque d'inflammation aux fréquences particulières utilisées par l'émetteur. Cela dépend du type de substance inflammable et du périmètre de la boucle formée par les structures métalliques (habituellement tuyauterie) et peut être très facilement déterminé à partir de tableaux ou de graphiques. La zone vulnérable devrait ensuite être déterminée à partir de cette valeur minimale du champ, par calcul, par modélisation mathématique ou sur la base de tableaux/graphiques.

Si la zone vulnérable ainsi déterminée contient de tels sites sur lesquels on stocke ou on envisage de stocker des substances inflammables, il faut alors procéder à une évaluation plus détaillée, laquelle devrait se fonder sur les dimensions réelles éventuelles des structures métalliques, sur la nature du gaz de la ou des substances inflammables stockées et sur la valeur mesurée du champ. Pour ce faire il faudrait calculer la puissance qui peut être dégagée par la structure métallique afin de déterminer si cette puissance est supérieure à l'énergie minimale d'inflammation de la substance inflammable. Dans l'affirmative, cette puissance devrait être mesurée, et les modifications éventuellement nécessaires devraient être apportées à la structure et/ou d'autres mesures de sécurité mises en œuvre.

Aux risques d'inflammation, s'ajoutent les risques de détonation des matériaux explosifs. Les cas seront très rares mais des indications détaillées sont données dans des normes nationales comme la Norme BS 6657 au Royaume-Uni. Parmi d'autres effets indirects qui devraient être pris en considération, on trouve les brouillages causés aux systèmes de sécurité de véhicules, machines, grues, etc. qui sont situés à proximité ou dans les limites des sites des stations d'émission. L'immunité de ces systèmes relève des dispositions réglementaires relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) (voir l'Appendice 3).

Chaque fois que cela est nécessaire, il faudra prendre des précautions analogues dans leur principe à celles décrites au § 5.1.2.

## Appendice 1

### Exemples des valeurs calculées du champ à proximité d'antennes de radiodiffusion

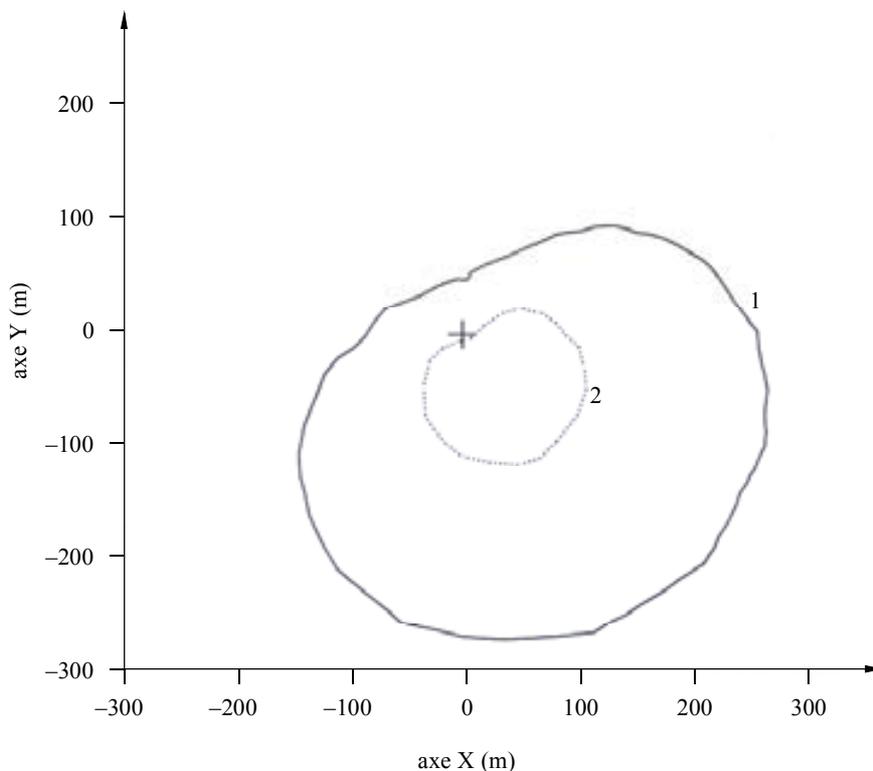
#### 1 Exemple A – Courbes du champ électrique et du champ magnétique

Il est dit dans le § 3 que l'on peut calculer numériquement la distribution du champ électrique et du champ magnétique à proximité d'antennes d'émission de radiodiffusion pour déterminer les valeurs du champ en certains points ou dans certaines zones, notamment dans la zone de champ proche où la structure du champ est généralement très complexe. Des calculs peuvent également être faits pour vérifier les contours du champ (lignes ou surfaces de champ constant) où les valeurs (niveaux) limites des restrictions concernant le champ électrique et le champ magnétique sont respectées. Ainsi, il est possible (par exemple, à des fins de planification) d'évaluer l'étendue des zones à l'intérieur desquelles des mesures de protection peuvent ou doivent être prises.

Dans un document technique de l'UER [2], on trouve un nombre important de résultats de tels calculs. Dans les Figures suivantes, certains résultats de calcul de ces exemples (antennes d'émission de radiodiffusion en ondes hectométriques et décamétriques) sont donnés sous forme de courbes.

FIGURE 5

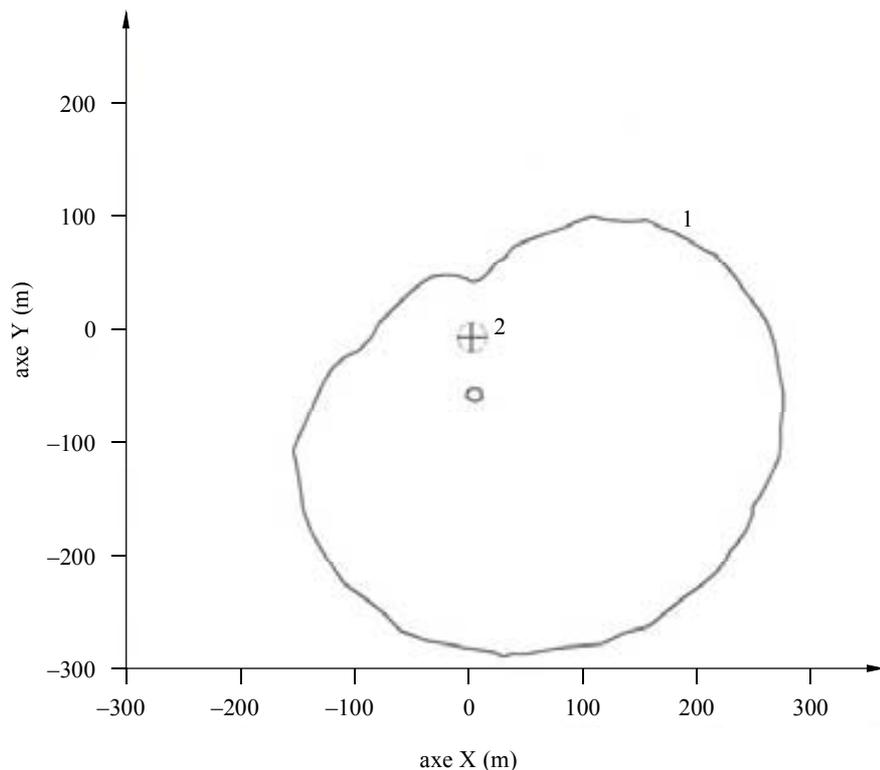
Antenne unipolaire en ondes hectométriques; contours du champ électrique (valeur efficace) représentant certains niveaux



1: ICNIRP (publication générale) = 60 V/m  
 2: 158 V/m  
 $E_{max}$ : 449,8 V/m  
 Fréquence: 1 422 kHz  
 Puissance: 600kW  
 Hauteur pour l'évaluation: 1,5 m au-dessus  
 du niveau du sol

FIGURE 6

Antenne unipolaire en ondes hectométriques; contours du champ électrique (valeur efficace) représentant certains niveaux



1: ICNIRP (publication générale) = 0,16 A/m

2: 1,3 A/m

$H_{max}$ : 1,6 A/m

Fréquence: 1 422 kHz

Puissance: 600 kW

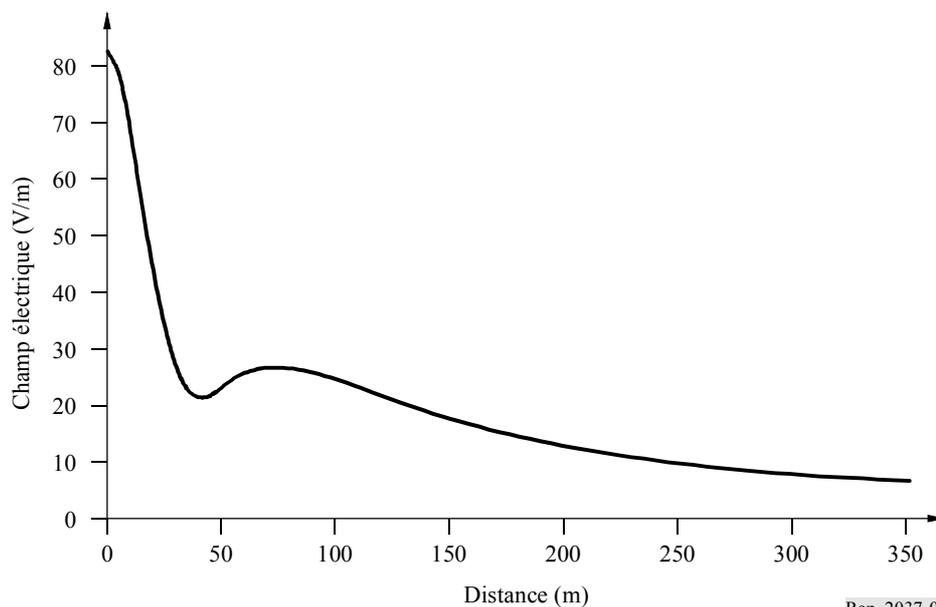
Hauteur pour l'évaluation: 1,5 m

au-dessus du niveau du sol

Rap. 2037-06

FIGURE 7

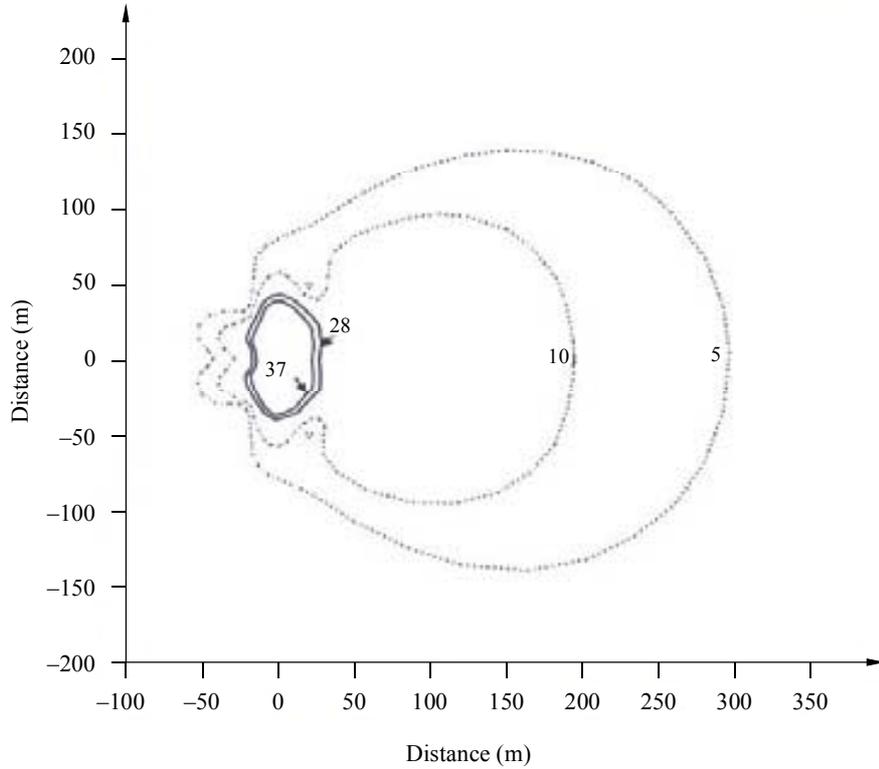
Réseau d'antennes-rideaux en ondes décamétriques; courbe de portée du champ électrique (valeurs efficaces) à 6 MHz et 500 kW (1,5 m au-dessus du niveau du sol)



Rap. 2037-07

FIGURE 8

Réseau d'antennes-rideaux en ondes décimétriques; contours du champ électrique (valeurs efficaces) (V/m) représentant certains niveaux

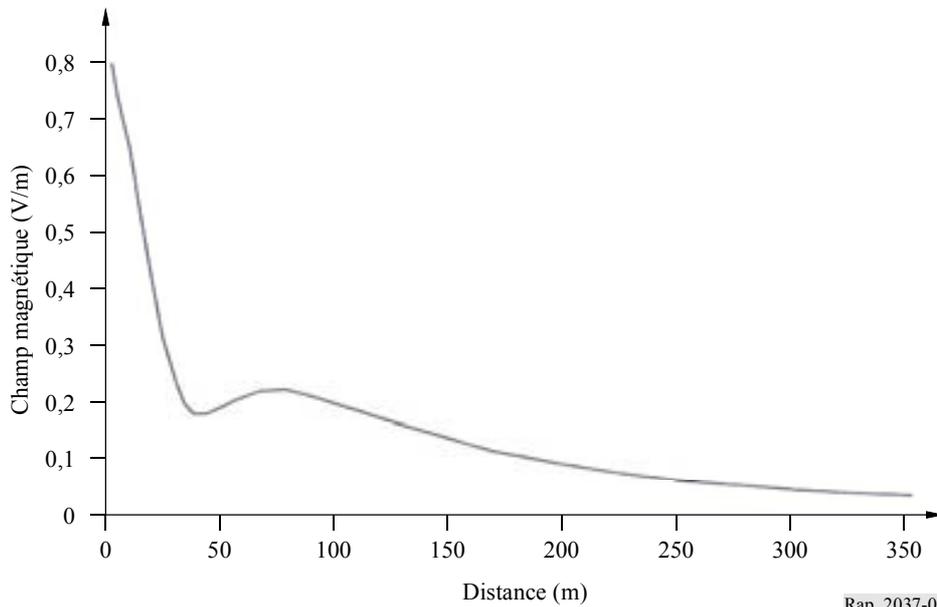


Puissance: 500 kW  
 Fréquence: 6 MHz  
 Hauteur pour l'évaluation: 1,5 m  
 au-dessus du niveau du sol

Rap. 2037-08

FIGURE 9

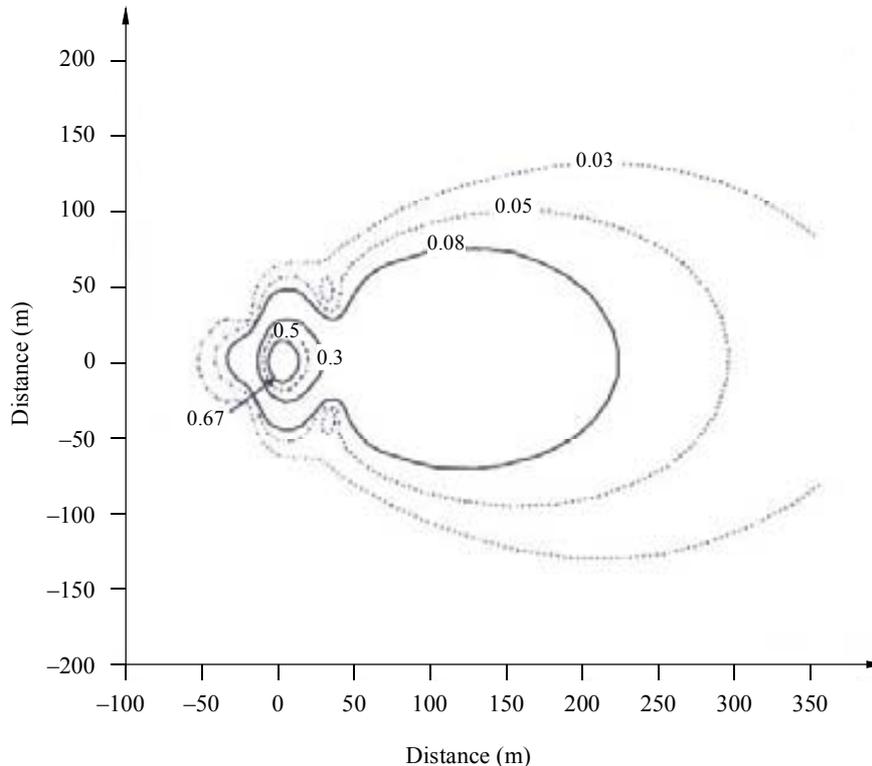
Réseau d'antennes-rideaux en ondes décimétriques; courbe de portée du champ magnétique (valeurs efficaces) à 6 MHz et 500 kW (1,5 m au-dessus du niveau du sol)



Rap. 2037-09

FIGURE 10

Réseau d'antennes-rideaux en ondes décamétriques; contours du champ magnétique (valeurs efficaces) (A/m) représentant certains niveaux



Puissance: 500 kW  
Fréquence: 6 MHz  
Hauteur pour l'évaluation: 1,5 m  
au-dessus du niveau du sol

Rap. 2037-10

## 2 Exemple B – Détermination du champ magnétique, dans la zone de champ proche, d'antennes de forte puissance en ondes hectométriques/kilométriques

Il s'agit dans le présent exemple de déterminer le champ magnétique dans la zone de champ proche d'antennes sur mât (antennes unipolaires), fonctionnant en ondes hectométriques/kilométriques, en résolvant l'équation intégrale de Hallen.

Dans les bandes de fréquences au-dessous de 10 MHz, les relations physiques dans le champ électromagnétique sont beaucoup plus complexes. Contrairement aux hyperfréquences où le champ électromagnétique a les caractéristiques du champ dans la zone de champ lointain, même à proximité de la source de rayonnement, et où le concept de densité de puissance rayonnée (intensité du vecteur de Poynting) est très utile, dans les bandes des ondes hectométriques/kilométriques, le champ à proximité de l'antenne est très complexe. En fait, dans la zone de champ proche, la relation simple entre le champ électrique et le champ magnétique n'existe plus: les deux champs ne sont plus en phase et leur rapport n'est plus de  $377 \Omega$ , ce qui complique encore les relations dans le champ électromagnétique au-dessous de 10 MHz.

Les valeurs mesurées du champ dépendront bien sûr du type d'antenne d'émission, de la puissance de l'émetteur et de la distance par rapport à l'antenne d'émission. Par exemple, dans le cas d'un émetteur de forte puissance, les valeurs du champ (composante E) pour des émetteurs types fonctionnant en ondes kilométriques/hectométriques peuvent aller de quelques volts par mètre (V/m) à plus de 250 V/m. A proximité immédiate de l'antenne d'émission, le champ peut être de l'ordre de 1 000 V/m.

### 3 Exemple C – Champ électromagnétique, dans la zone de champ proche, d'antennes-rideaux d'émission en ondes décamétriques

#### 3.1 Introduction

Cet exemple concerne des structures d'antenne beaucoup plus complexes, à savoir les antennes-rideaux. Ces antennes sont très importantes pour les émetteurs de forte puissance en ondes courtes (ondes décamétriques). Il s'agit en fait de réseaux de doublets horizontaux disposés dans un plan vertical.

La tendance générale à augmenter la puissance et le gain des antennes d'émission est très marquée en radiodiffusion à ondes décamétriques. Une puissance de 500 kW pour l'émetteur et un gain (dans la direction du rayonnement maximal) de plus de 20 dB pour l'antenne (par rapport à un doublet demi-onde) sont devenus des valeurs pour ainsi dire classiques dans les grands centres d'émission pour la diffusion mondiale. Un émetteur de 500 kW avec une antenne présentant un gain de 20 dB rayonne une puissance apparente de 50 MW.

Au § 3.2, on décrit brièvement la technique numérique qui a été utilisée pour calculer le champ électrique et le champ magnétique, dans la zone de champ proche, d'antennes de forte puissance. Au § 3.3, on donne les résultats obtenus pour les champs à proximité d'antennes-rideaux à ondes décamétriques.

#### 3.2 Analyse numérique de structures filaires

Les calculs des champs proches d'antennes-rideaux ont été faits à l'aide du programme AWAS (Analysis of Wire Antennas and Scatterers), un des nombreux programmes élaborés à l'Ecole d'ingénierie électrique de l'Université de Belgrade pour l'analyse d'antennes filaires et de diffuseurs. Schématiquement, le programme est basé sur la formulation de l'équation dite à deux potentiels pour la distribution du courant le long des fils. On résout cette équation à l'aide de la méthode MOM, avec une approximation polynomiale pour le courant.

Soit une structure arbitraire située dans le vide et assemblée à partir de tronçons de fil rectilignes parfaitement conducteurs. Conformément aux conditions limites, à la surface des fils, la composante tangentielle du champ électrique total doit être égale à zéro, c'est-à-dire:

$$(\mathbf{E} + \mathbf{E}_i)_{\text{tg}} = 0 \quad (13)$$

où:

$\mathbf{E}$ : champ électrique produit par les courants et les charges de la structure filaire

$\mathbf{E}_i$ : champ électrique appliqué qui modélise l'excitation fournie au système.

Le champ appliqué peut être par exemple le champ électrique d'une onde plane incidente (lorsqu'on analyse des diffuseurs ou des antennes de réception) ou un champ situé dans une petite région aux bornes de l'antenne, qui modélise le générateur entraînant l'antenne (lorsqu'on analyse des antennes d'émission).

Le champ électrique produit par les courants et les charges circulant dans les fils peut être exprimé en termes de potentiel magnétique vectoriel,  $\mathbf{A}$ , et de potentiel électrique scalaire,  $V$ :

$$\mathbf{E} = -j\omega\mathbf{A} - \text{grad}V \quad (14)$$

où:

$\omega$ : fréquence angulaire ( $\omega = 2\pi f$ ).

Les deux potentiels, à leur tour, peuvent être exprimés sous la forme de densités des courants ( $\mathbf{J}_s$ ) et des charges ( $\rho_s$ ), de surface qui sont corrélées par l'équation de continuité. Ensuite, on fait des approximations des courants et des charges de surface à l'aide des courants et des charges circulant dans les lignes (approximation avec des fils de fin diamètre) et la structure filaire est divisée en  $N$  tronçons (chacun d'eux ayant un axe local  $s_m$ ). Enfin, l'équation à deux potentiels (appelée également équation à potentiel vectoriel et à potentiel scalaire) pour la distribution du courant s'écrit comme suit:

$$\sum_{m=1}^N \int_0^{h_m} \left[ \mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m(s_m) g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{dI_m(s_m)}{ds_m} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j \omega \mu_0} \quad (15)$$

où:

$I_m$ : intensité du courant le long d'un tronçon de fil

$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ : coefficient de phase en espace libre

$g(r_a) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-j k r_a)}{r_a}$ : fonction de Green correspondante

$r_a$ : distance moyenne approximative entre le point à la surface de l'élément filaire  $ds_m$  et le point du champ.

L'équation (15) est une équation intégrale et différentielle pour la distribution du courant et elle ne peut être résolue que numériquement. A cette fin, on suit les directives générales de la méthode MOM et on fait une approximation de la fonction inconnue  $I_m(s_m)$  à l'aide d'une série de fonctions connues (fonctions de base) avec des coefficients de pondération inconnus. Comme fonctions de base, on choisit les fonctions de puissance simples, lesquelles se résument à l'approximation polynomiale de la distribution du courant, c'est-à-dire:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^i \quad (16)$$

où:

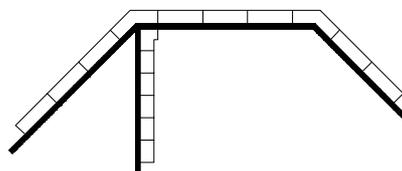
$h_m$ : longueur du tronçon

$I_{mi}$ : coefficients de pondération.

L'équation (15) ne peut être résolue de façon satisfaisante en tous les points le long des tronçons de fil mais uniquement de façon approximative. Conformément à la méthode MOM, un ensemble de fonctions de pondération est choisi et les produits scalaires de l'équation (15) et ces fonctions sont évalués. On considère que les fonctions de pondération sont des impulsions. Chaque impulsion est une constante unitaire définie sur un sous-tronçon court, sinon elle est égale à zéro. Une distribution type des impulsions est donnée dans la Fig. 11.

FIGURE 11

Distribution type des fonctions de pondération sous forme d'impulsions utilisées dans le programme AWAS



Pour une impulsion définie sur le sous-tronçon  $(s_{p1}, s_{p2})$  le long de l'axe du tronçon de fil  $p$ , l'évaluation du produit scalaire donne l'équation (17):

$$\sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left\{ \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \int_0^{h_m} \mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) ds_m ds_p + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \int_0^{h_m} \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} [g(r_a)_{s_{p2}} - g(r_a)_{s_{p1}}] ds_m \right\} \\ + \sum_{i=0}^{n_p} I_{pi} \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{Z'(s_p)}{j \omega \mu_0} \left( \frac{s_p}{h_p} \right)^i ds_p = \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j \omega \mu_0} ds_p \quad (17)$$

Dans cette équation  $\mathbf{u}_p$  est le vecteur unitaire du tronçon de fil  $p$ , et  $Z'$  est l'impédance linéique d'une éventuelle charge d'impédance répartie le long du tronçon. Lorsqu'elles sont évaluées pour toutes les impulsions, les équations de type (17) comprennent un système d'équations linéaires en  $I_{mi}$ , qui peuvent être résolues numériquement.

Une fois connus les coefficients  $I_{mi}$ , la distribution du courant approximative le long des tronçons de fil est déterminée et il est possible d'évaluer diverses caractéristiques de la structure filaire. Dans le présent Rapport, nous nous intéressons essentiellement au champ électrique et au champ magnétique proches. Le champ électrique peut être évalué en termes de deux potentiels tout comme lorsqu'on résout l'équation à deux potentiels:

$$\mathbf{E} = -j \omega \mu_0 \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left[ \mathbf{u}_m \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m \quad (18)$$

Le champ magnétique peut être exprimé en termes de potentiel magnétique vectoriel:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} \quad (19)$$

Lorsque ce potentiel est exprimé en termes de courants circulant dans les fils, on obtient:

$$\mathbf{H} = - \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left( \frac{s_m}{h_m} \right)^i \mathbf{u}_m \times \text{grad } g(r_a) ds_m \quad (20)$$

### 3.3 Champ électrique et champ magnétique proches d'antennes-rideaux

Les antennes d'émission de forte puissance utilisées dans la gamme des ondes décimétriques (ondes courtes) sont très variées: doublets horizontaux (formant en général un réseau directif), antennes losanges et antennes unipolaires verticales. Les antennes étudiées sont des réseaux de doublets horizontaux, disposés dans un plan vertical, appelés antennes-rideaux. On envisage d'utiliser ce type de réseaux d'antennes dans le nouveau centre d'émission en ondes courtes de Radio Yougoslavie situé à Stubline près de Belgrade. Dans un réseau d'antennes-rideaux les doublets sont généralement des doublets demi-onde simples ou repliés, alimentés par des courants d'amplitudes quasiment égales (mais parfois de phases différentes) pour produire le diagramme de rayonnement désiré.

Le réseau d'antennes comporte généralement un réflecteur passif qui dans la plupart des cas concrets se compose d'un treillis métallique (réflecteur aperiodique) mais il peut également s'agir d'un réseau de doublets accordés. Les antennes réseaux sont caractérisés par  $H(R)(S) m/n/h$  où  $H$  indique un réseau de doublets horizontaux disposés dans un plan vertical,  $R$  un réflecteur (s'il y en a un),  $S$  un décalage de phase (s'il y en a) entre les courants alimentant des doublets adjacents corectilignes pour décaler l'azimut du faisceau principal;  $m$  indique le nombre de doublets corectilignes dans chaque rangée,  $n$  le nombre de doublets parallèles empilés verticalement (habituellement à une distance d'une demi-longueur d'onde), c'est-à-dire le nombre de rangées (baies) et  $h$  la hauteur de la rangée la plus basse au-dessus du niveau du sol (en longueur d'onde).

Les antennes-rideaux ont d'excellentes propriétés, notamment un gain élevé (plus de 20 dB), c'est-à-dire un diagramme de rayonnement hautement directif et des capacités de traitement haute puissance (jusqu'à 500 kW). Par conséquent, elles jouent un rôle très important dans les grands centres d'émission en ondes décamétriques. Il s'agit avant tout de mettre au point une technique efficace et précise d'évaluation de ces champs.

Le nouveau centre en ondes décamétriques de Radio Yougoslavie comprend au total 15 antennes à polarisation horizontale. Deux de ces antennes sont des antennes à quadrant équidirectives et les treize autres sont des antennes-rideaux doublets (Fig. 12). Sept antennes-rideaux contiennent chacune seize doublets repliés disposés en quatre baies de quatre éléments (HRS 4/4/h) et six antennes-rideaux contiennent chacune deux doublets repliés disposés en une seule baie (HR 2/1/h). Toutes les antennes-rideaux ont un réflecteur aperiodique constitué par des fils horizontaux fins. Le centre a deux émetteurs. La puissance de chaque émetteur est de 500 kW (porteuse non modulée) et il est possible d'émettre simultanément deux programmes vers deux destinations différentes. Les émetteurs sont connectés aux antennes correspondantes au moyen d'un dispositif de commutation situé dans une pièce voisine de l'endroit où se trouve l'émetteur. La disposition du champ de l'antenne et le bâtiment où se trouvent les émetteurs sont illustrés à la Fig. 13. La Fig. 14 donne les détails d'une antenne (B12).

FIGURE 12

**Antennes-rideaux types du centre en ondes  
décamétriques de Radio Yougoslavie**

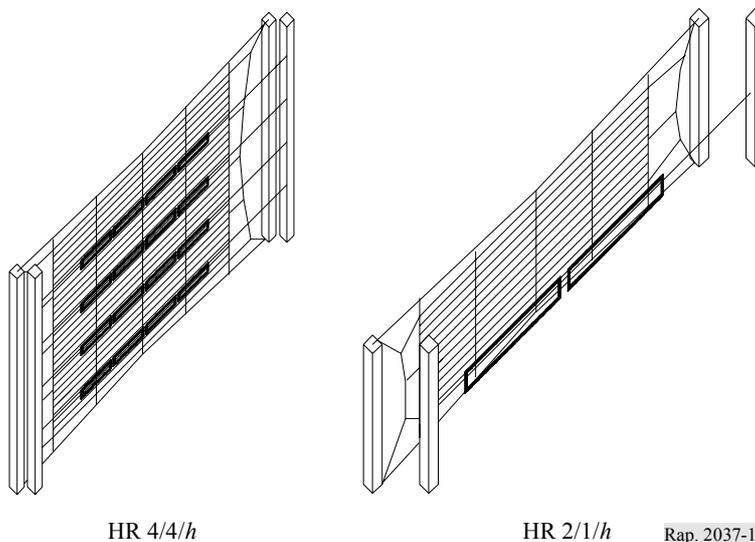
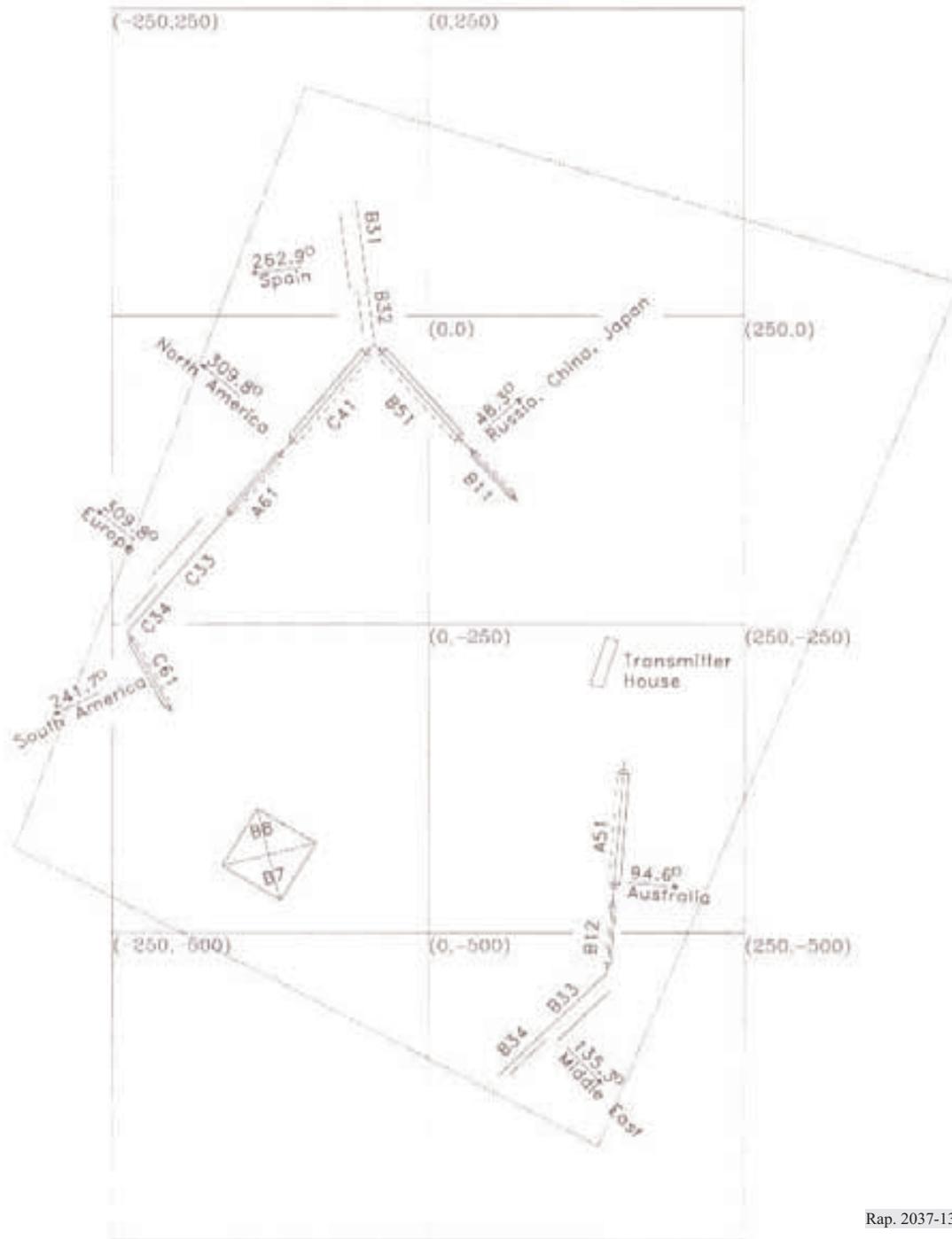


FIGURE 13  
Disposition du champ d'antennes du centre en ondes décamétriques de Radio Yougoslavie



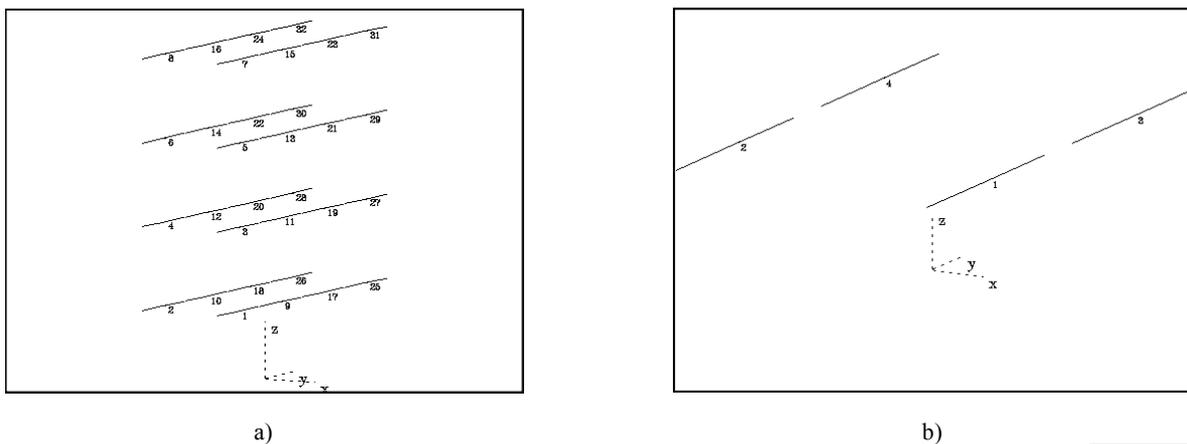


Dans la littérature, peu d'ouvrages traitent du calcul du champ électrique et du champ magnétique d'antennes-rideaux en ondes décimétriques, mais tous sont basés sur l'approximation sinusoïdale de la distribution du courant le long de doublets et sur l'hypothèse que les doublets d'alimentation en courant ont des amplitudes identiques. Le but est de fournir une analyse plus rigoureuse en utilisant une approximation plus précise de la distribution du courant et en tenant compte du couplage entre les éléments du réseau d'antennes, c'est-à-dire en alimentant les éléments par des tensions d'égales amplitudes.

Il a été démontré expérimentalement (et confirmé théoriquement à l'aide de l'approximation sinusoïdale de la distribution du courant) qu'en faisant une approximation et en représentant le sol réel par un plan parfaitement conducteur on obtient des résultats précis. Cette simplification est importante car elle permet d'utiliser le programme AWAS directement, sans aucune modification étant donné qu'il peut traiter uniquement les antennes situées sur un sol parfait. L'analyse a été accélérée en remplaçant les doublets simples par des doublets repliés. On a procédé à cette approximation pour obtenir des résultats précis. La longueur d'un doublet simple est prise comme étant légèrement inférieure à une demi-longueur d'onde à la fréquence nominale, compte tenu des données résultant des dimensions des antennes-rideaux existantes. La distance entre les points d'alimentation d'antennes adjacentes est toujours égale à une demi-longueur d'onde, à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical. La distance entre les doublets et le réflecteur correspond exactement à un quart de longueur d'onde. On a modélisé le réflecteur en introduisant des images négatives (dans le plan vertical) des doublets d'origine. La distance entre les doublets d'origine et leurs images respectives est donc d'une demi-longueur d'onde. La Fig. 15 montre des modèles AWAS d'antennes-rideaux types du centre en ondes décimétriques de Radio Yougoslavie.

FIGURE 15

Modèle AWAS de a) l'antenne HRS 4/4/h et de b) l'antenne HR 2/1/h



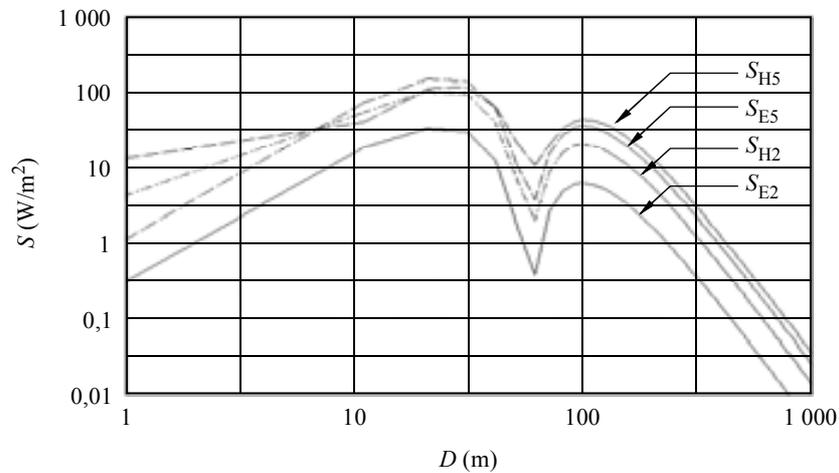
Rap. 2037-15

Les champs électrique et magnétique proches ont été évalués dans la direction du rayonnement maximal (étant donné qu'on a constaté que le champ dans la direction des lobes latéraux était sensiblement plus faible). Pour l'évaluation des risques de rayonnement la hauteur  $z$  était de 2 m pour ce qui est des personnes travaillant dans le centre et susceptibles de se déplacer dans le périmètre de ce centre et de 5 m pour le grand public, compte tenu de la présence d'éventuelles maisons d'habitation à deux étages.

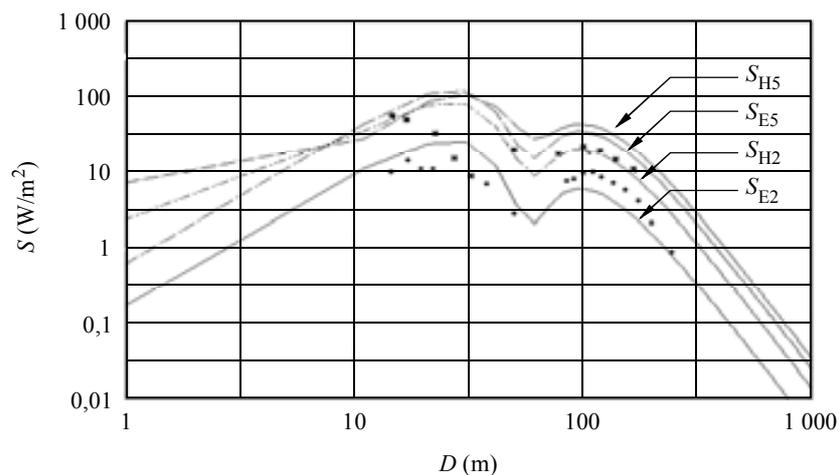
Les résultats des analyses ont tout d'abord été comparés à ceux obtenus avec une antenne HRS 4/4/1. La fréquence de fonctionnement de l'antenne est de 15,245 MHz et la puissance fournie est de 500 kW. La Fig. 16a) montre les résultats pour le vecteur de Poynting «équivalent», tels qu'ils ont été évalués par le système AWAS, lorsqu'on suppose que les doublets sont alimentés par des courants identiques. La Fig. 16b) montre les mêmes résultats mais dans l'hypothèse où les doublets sont alimentés par des tensions identiques, pour une hauteur  $z = 2$  m. Il y a une bonne concordance entre les données théoriques et les données expérimentales. Il est évident qu'en alimentant l'antenne avec des tensions identiques on obtient une meilleure prévision du champ réel, en particulier à proximité du «dip» à 70 m de l'antenne.

FIGURE 16

Vecteur de Poynting «équivalent» de l'antenne HRS 4/4/1 évalué à l'aide du système AWAS lorsque les doublets sont alimentés par  
a) des courants identiques ou par b) des tensions identiques  
et données expérimentales (points)



a)



b)

Rap. 2037-16

Avec la méthode numérique utilisée pour calculer les champs proches, les champs de toutes les antennes-rideaux du nouveau centre de Radio Yougoslavie ont été évalués. Deux exemples représentatifs sont donnés dans les Fig. 17 et 18.

FIGURE 17

Vecteur de Poynting «équivalent» de l'antenne A51 (HRS 4/4/0,5), fonctionnant à 9,63701 MHz. La distance de sécurité par rapport à l'antenne est de 50 m pour les personnes travaillant dans le centre et de 300 m pour le grand public

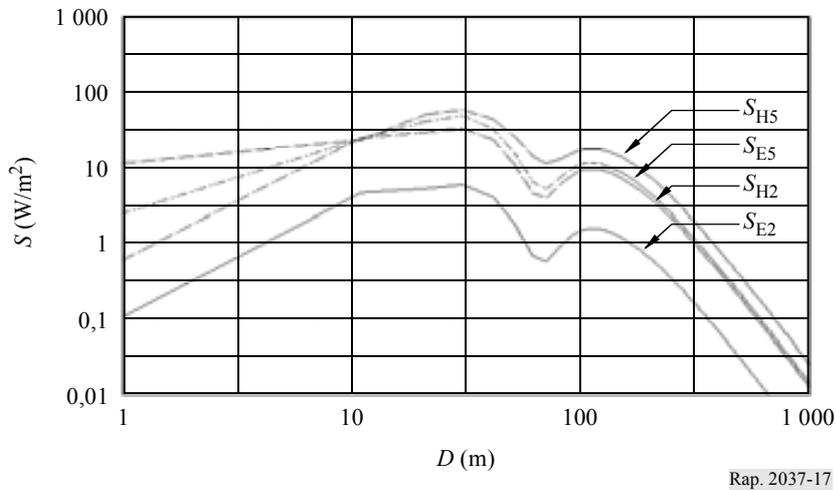
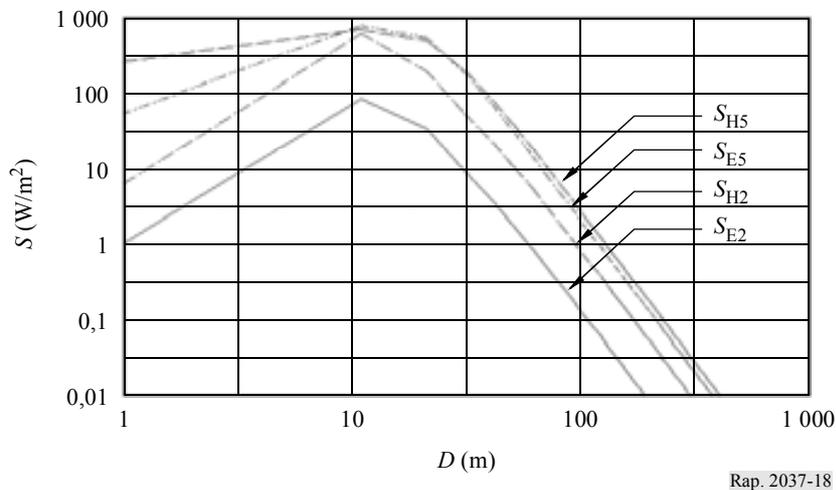


FIGURE 18

Vecteur de Poynting «équivalent» de l'antenne C34 (HR 2/1/0,5), fonctionnant à 10,67996 MHz. La distance de sécurité par rapport à l'antenne est de 70 m pour les personnes travaillant dans le centre et de 130 m pour le grand public



#### 4 Conclusions

On a étudié théoriquement, à l'aide du programme AWAS, les champs électrique et magnétique proches à proximité d'antennes-rideaux d'émission de forte puissance en ondes décimétriques. La théorie a été appliquée en particulier aux antennes du nouveau centre de Radio Yougoslavie. Les zones de sécurité pour les personnes se déplaçant à proximité de ces antennes ont été déterminées. Les résultats correspondant aux champs proches des antennes-rideaux sont présentés pour la première fois à l'aide d'une théorie rigoureuse et on constate qu'il y a une bonne concordance avec les données expérimentales publiées dans d'autres ouvrages.

## Appendice 2

### Comparaison entre prévisions et mesures

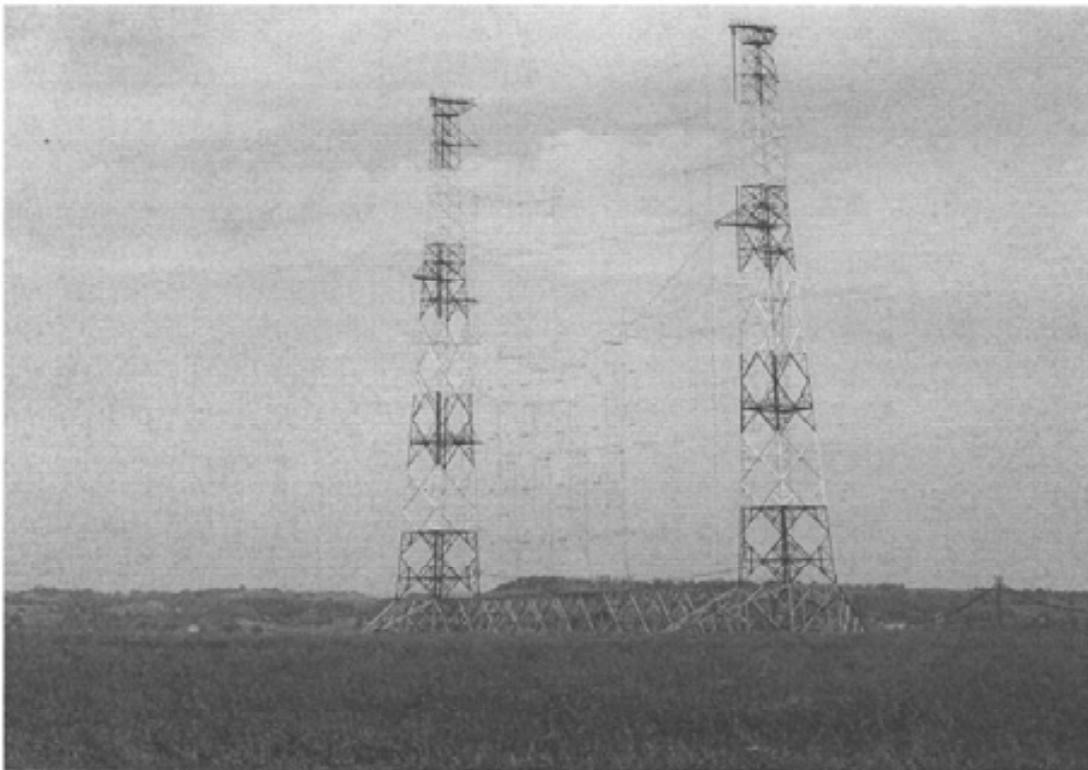
#### 1 Introduction

Des simulations et des mesures ont été faites séparément par des personnels différents ne pouvant pas communiquer entre eux pour éviter toute influence réciproque dans les travaux et les résultats.

Le système d'antenne n'a été que partiellement simulé étant donné qu'il est particulièrement complexe (voir le § 1.1 pour le modèle d'antenne).

Les mesures et les prévisions ont été réalisées sur un système d'antenne représenté dans les Fig. 19 et 20, pouvant fonctionner de façon satisfaisante dans la bande des ondes courtes. Des comparaisons ont été faites à 13 et à 18 MHz.

FIGURE 19  
Système d'antenne



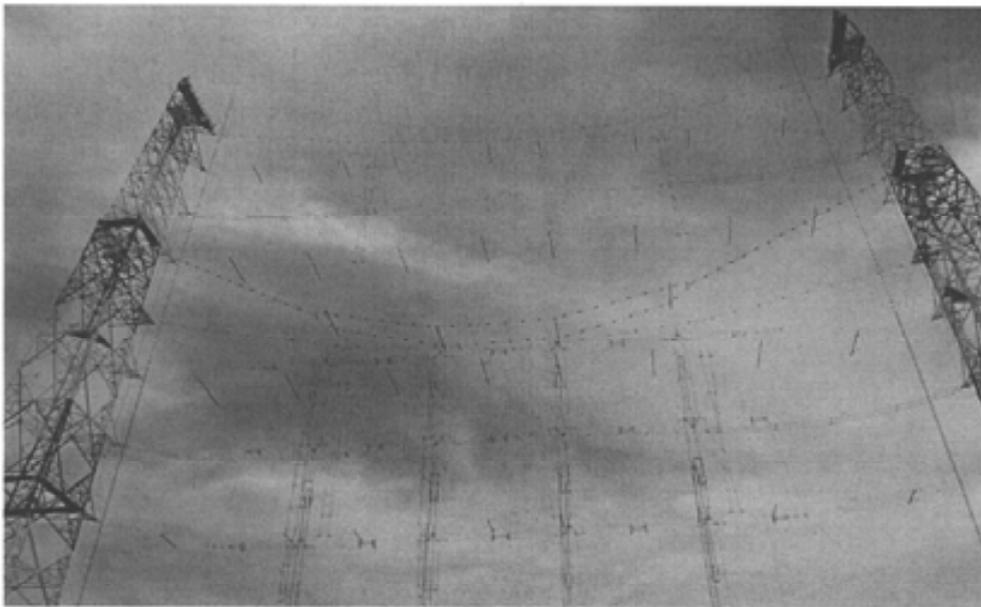
Rap. 2037-19

#### 1.1 Modèle utilisé pour le système d'antenne

Le système d'antenne, représenté à la Fig. 19, se compose d'un réseau de 16 doublets repliés à polarisation horizontale disposés devant un réflecteur constitué par un réseau de câble. Les doublets sont alimentés par des lignes bifilaires formant un réseau d'adaptation d'impédance complexe;

toutes les lignes bifilaires de ce réseau d'adaptation d'impédance représenté à la Fig. 20 sont disposées pour la plupart d'entre elles dans le plan vertical (perpendiculairement aux doublets); certaines lignes horizontales sont relativement courtes et disposées perpendiculairement aux doublets et aux systèmes d'alimentation, dans le sens de la propagation. A la base de l'antenne, il y a d'autres lignes bifilaires qui sont utilisées pour dispatcher la puissance RF entre les quatre «colonnes» de doublets.

FIGURE 20

**Réseau d'adaptation et réseau d'alimentation**

Rap 2037-20

Pour simplifier le modèle et éviter des détails inutiles et, par conséquent, de longs calculs, le système tout entier a été modélisé comme un réseau simple de 16 doublets (Fig. 21); chaque doublet est alimenté par son propre générateur de tension mis en phase avec tous les autres et il n'est pas nécessaire d'avoir un réseau d'adaptation/d'alimentation. Par ailleurs, chaque doublet replié, réalisé concrètement par deux fils parallèles repliés aux extrémités, a été modélisé comme un doublet replié à un seul fil, d'une section adéquate pour obtenir une même valeur de l'impédance.

Enfin, chaque doublet a été représenté par 24 tronçons, chacun d'une longueur maximale de  $\lambda/20$  (voir Fig. 22).

**1.2 Avantages et inconvénients du modèle de système d'antenne mis en œuvre**

Le plus gros avantage est l'extrême simplicité du modèle réalisé par rapport à la complexité du système d'antenne réel. Grâce à ce modèle en effet, le temps de calcul est relativement faible (environ dix minutes avec un ordinateur Pentium 4 à 2 GHz).

Un autre avantage est la possibilité de pouvoir adapter facilement le modèle si nécessaire pour mieux représenter le système réel. De fait, en règle générale, les résultats d'une première comparaison entre simulations et mesures constituent une bonne base pour effectuer des ajustements sur le

premier modèle. Le plus gros inconvénient de ce modèle simple est l'impossibilité de bien tenir compte de la part relative du réseau d'adaptation/d'alimentation complexe dans les composantes  $x$ ,  $y$  et  $z$  des champs. En fait, une certaine quantité de puissance est rayonnée par les lignes d'adaptation bifilaires qui fonctionnent en ondes stationnaires. Pour cette raison, la composante verticale du champ  $E$  (composante  $z$ ) n'apparaît pas dans le résultat tout comme la composante horizontale dans le sens de la propagation (composante  $y$ ), sauf dans certains cas où les valeurs sont extrêmement faibles; il en va de même pour la composante  $x$  du champ  $H$  car la prévision a été faite sans tenir compte des éléments rayonnants verticaux et dans le sens de la propagation. Dans les résultats des mesures, par contre, les composantes verticale ( $z$ ) et horizontale ( $y$ ) du champ  $E$  apparaissent, tout comme la composante horizontale ( $x$ ) du champ  $H$ , ce qui cause quelques problèmes pour effectuer une comparaison directe. La chose la plus raisonnable à faire est de considérer que ces deux composantes sont générées par la même quantité de puissance qui n'atteint pas le réseau de doublets; leur contribution dans la valeur mesurée du champ devrait être prise en compte dans la contribution de la composante horizontale ( $x$ ) pour ce qui est du résultat des simulations. En d'autres termes, la contribution de la composante horizontale ( $x$ ) résultant de la simulation doit être comparée avec le résultat global des mesures, lequel est égal à la racine carrée de la somme des carrés des contributions mesurées sur les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

FIGURE 21

**Modèle de réseau de doublets et orientation dans le système à trois axes X, Y, Z. Chaque doublet est alimenté par son propre générateur de tension, en phase avec tous les autres.  
Les composantes  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$  des champs  $E$  et  $H$  au point d'évaluation ont la même orientation de l'axe X, Y, Z**

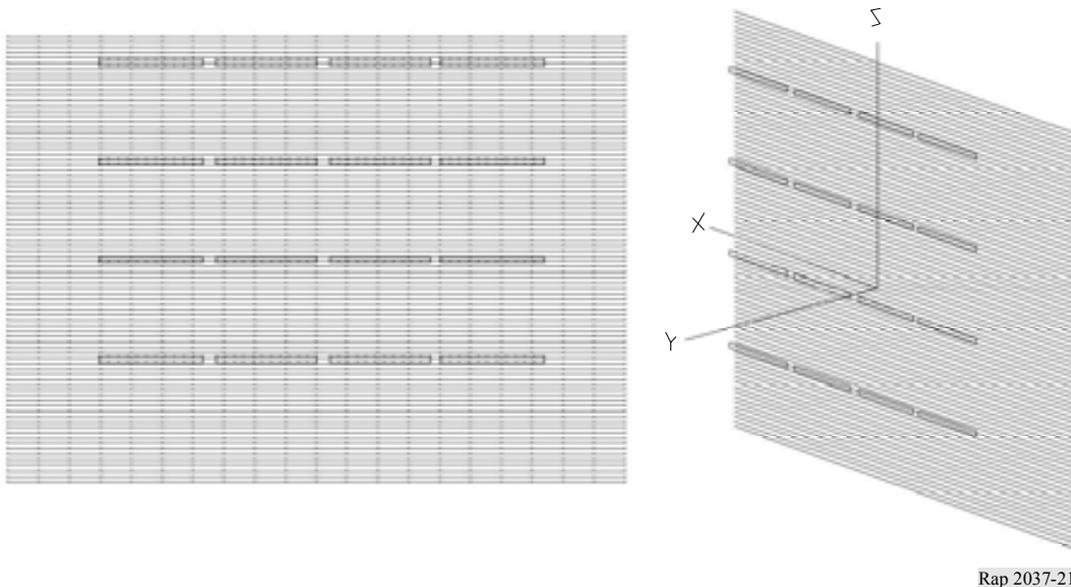


FIGURE 22

**Modèle à doublet unique. Le doublet est modélisé par 24 tronçons, chacun d'une longueur inférieure à  $\lambda/20$ . L'excitation est appliquée au centre du bras supérieur ou du bras inférieur, au milieu du tronçon central**



Rap 2037-22

## 2 Comparaison entre prévisions et mesures

### 2.1 13 MHz

#### 2.1.1 Prévisions

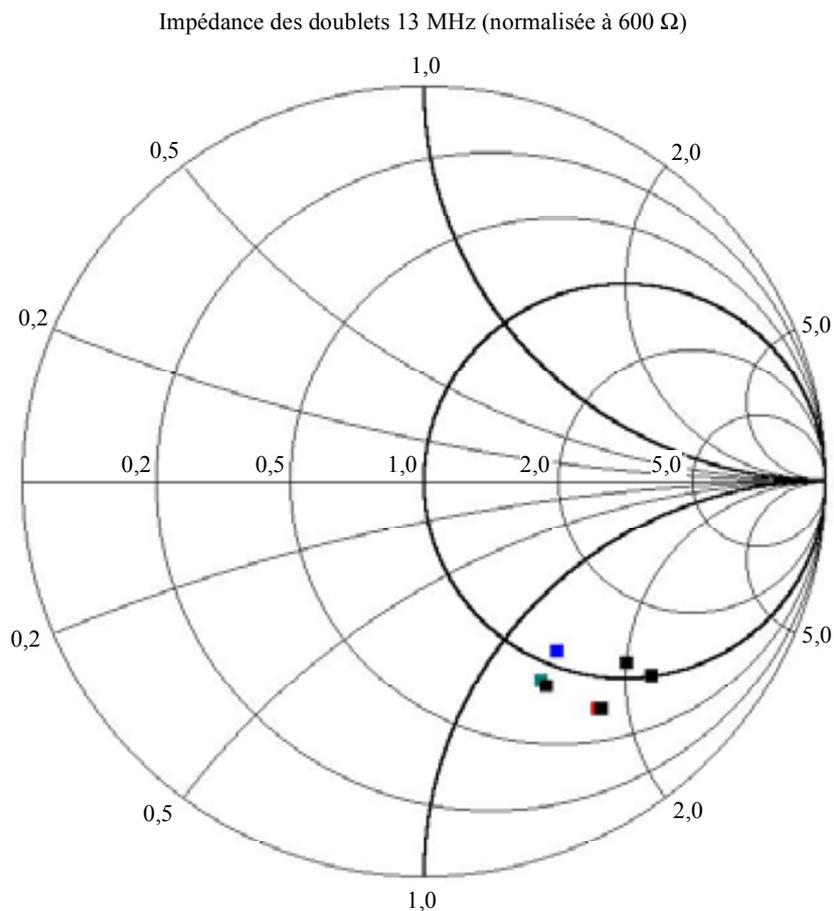
##### 2.1.1.1 Notes concernant le modèle

Pour que la correspondance entre le modèle décrit précédemment et le système d'antenne réel soit optimale, il faut connaître la quantité exacte de puissance à l'entrée de chaque doublet, compte tenu des pertes dans les lignes de transmission et des affaiblissements.

Pour appliquer la tension appropriée à chaque doublet, on a calculé pendant la simulation l'impédance d'entrée de chaque doublet. Les valeurs sont données à la Fig. 23.

FIGURE 23

**Impédance d'entrée des doublets obtenue à partir de la simulation, normalisée à 600  $\Omega$ . A noter la dispersion faible - mais non inexistante - des valeurs de la résistance à proximité de 600  $\Omega$**



Ensuite, on a adopté pour chaque doublet une seule et même valeur de  $600 \Omega$  pour la résistance qui représente la valeur moyenne obtenue à partir de la simulation. On notera que cette décision peut être à l'origine d'inexactitudes dans les résultats des prévisions.

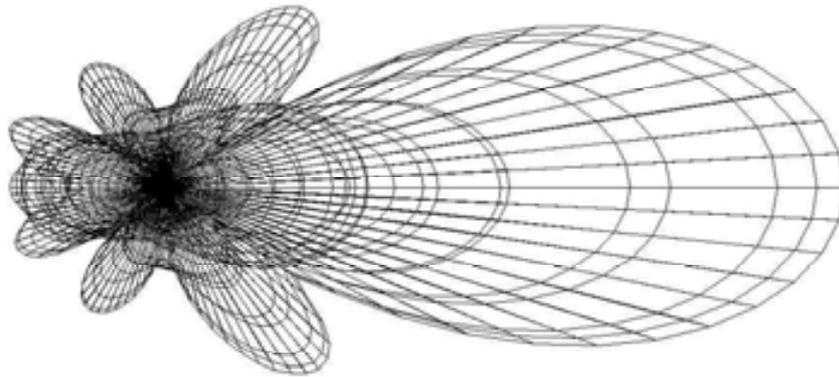
Pour compenser le défaut d'adaptation essentiellement dû à la composante réactive et à la réflexion de puissance qui en résulte en direction de l'émetteur, on a été d'avis qu'il fallait augmenter de façon adéquate la puissance. Par conséquent, la tension appliquée à chaque doublet est suffisante.

### 2.1.1.2 Evaluations du champ lointain

Pour que la comparaison entre le modèle et les antennes réelles (Fig. 19 et Fig. 20) soit optimale, on a calculé les diagrammes de rayonnement. Les résultats font l'objet de la Fig. 24 (plan horizontal), de la Fig. 25 (plan vertical) et de la Fig. 26 (vue frontale).

FIGURE 24

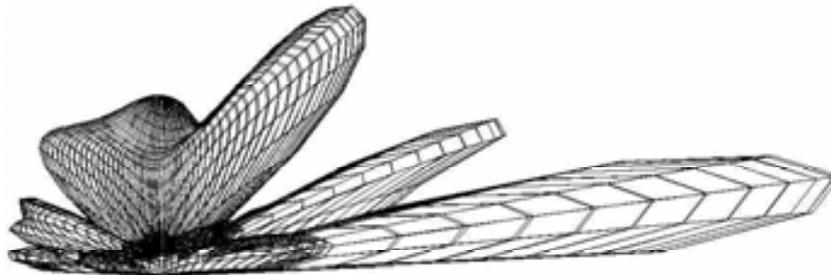
Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal



Rap 2037-24

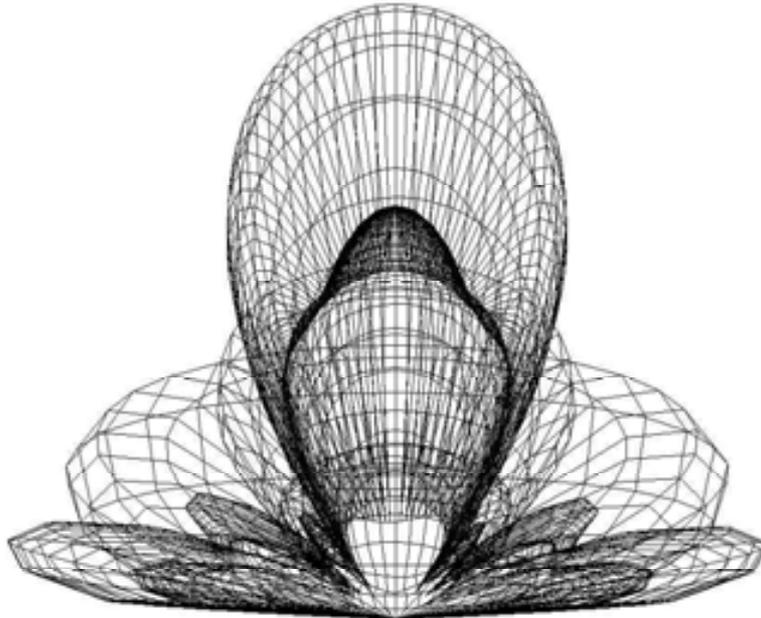
FIGURE 25

Diagramme de rayonnement dans le plan vertical



Rap 2037-25

FIGURE 26  
Diagramme de rayonnement, vue frontale



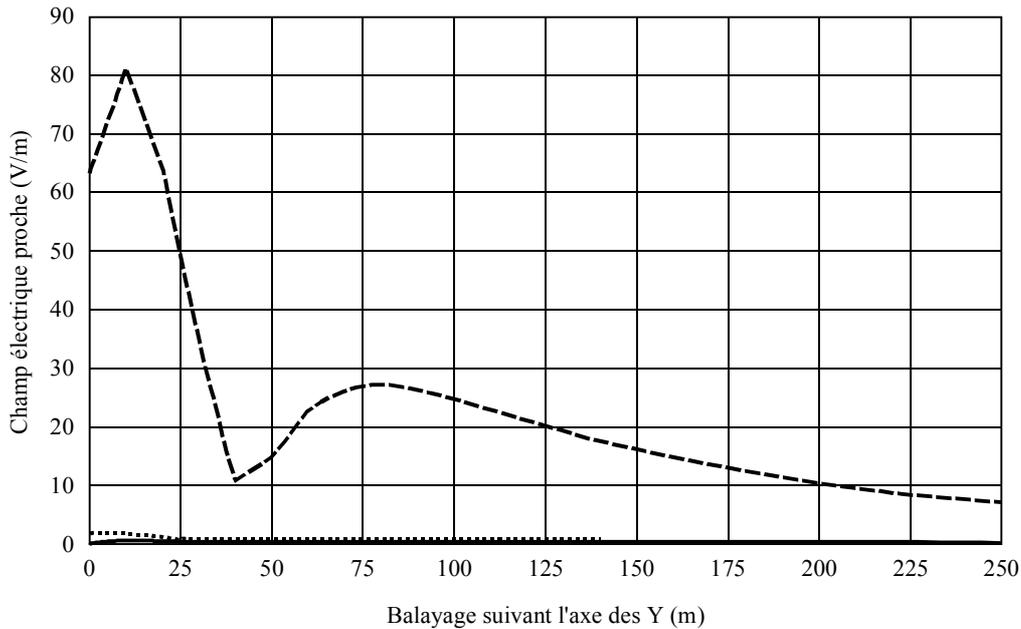
Rap 2037-26

### 2.1.1.3 Résultats des prévisions du champ proche

On a réalisé les prévisions en calculant les composantes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  des champs  $E$  et  $H$  dans la direction du gain maximal de l'antenne (axe  $Y$ ) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol (axe  $Z = 2$ ). Les valeurs calculées sont représentées à la Fig. 27 (champ  $E$ ) et à la Fig. 28 (champ  $H$ ). La forte incidence du relief aussi bien dans les évaluations que dans les mesures peut introduire une différence supplémentaire entre les deux résultats. Pour montrer la forte incidence du relief, on a également calculé les valeurs des champs  $E$  et  $H$  en faisant varier la hauteur du point d'évaluation par rapport au sol (axe  $Z$ ) de 0 à 9 m, pour une distance fixe de 60 m ( $Y = 60$ ). Les résultats sont illustrés à la Fig. 29 (champ  $E$ ) et à la Fig. 30 (champ  $H$ ).

FIGURE 27

## Valeurs calculées du champ E dans la zone de champ proche



13 MHz, champ électrique proche en fonction de la distance, puissance de l'émetteur:  
225 kW au niveau du connecteur d'antenne. Hauteur 2 m par rapport au sol

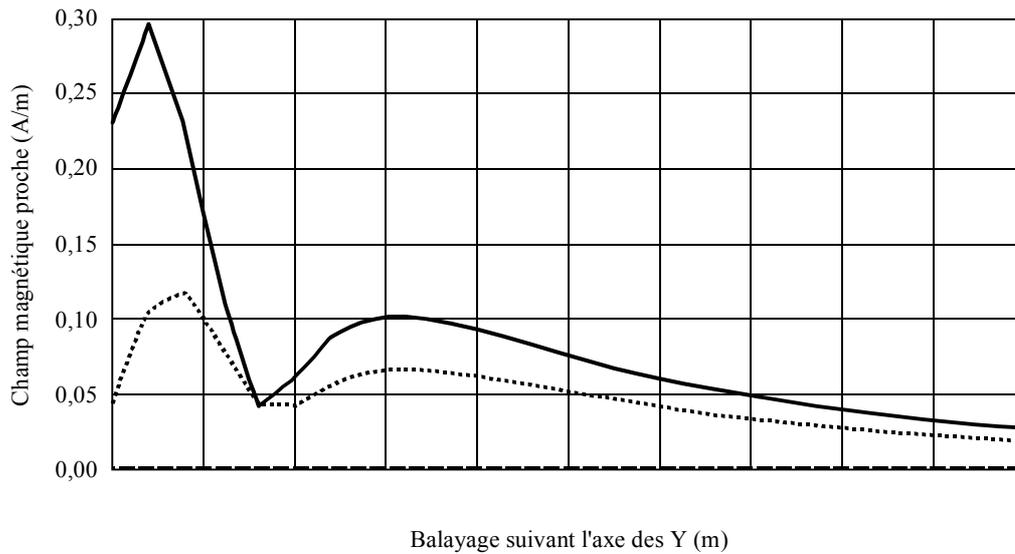
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- ..... Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13

Rap 2037-27

La composante la plus importante est la composante x. Sur l'axe horizontal on représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des Y). Z est fixé à 2 m (hauteur par rapport au sol). L'intensité des composantes du champ E est représentée en V/m sur l'axe vertical.

FIGURE 28

## Valeurs calculées du champ H dans la zone de champ proche



13 MHz, champ magnétique proche en fonction de la distance; puissance de l'émetteur: 225 kW au niveau du connecteur d'antenne. Hauteur 2 m par rapport au sol

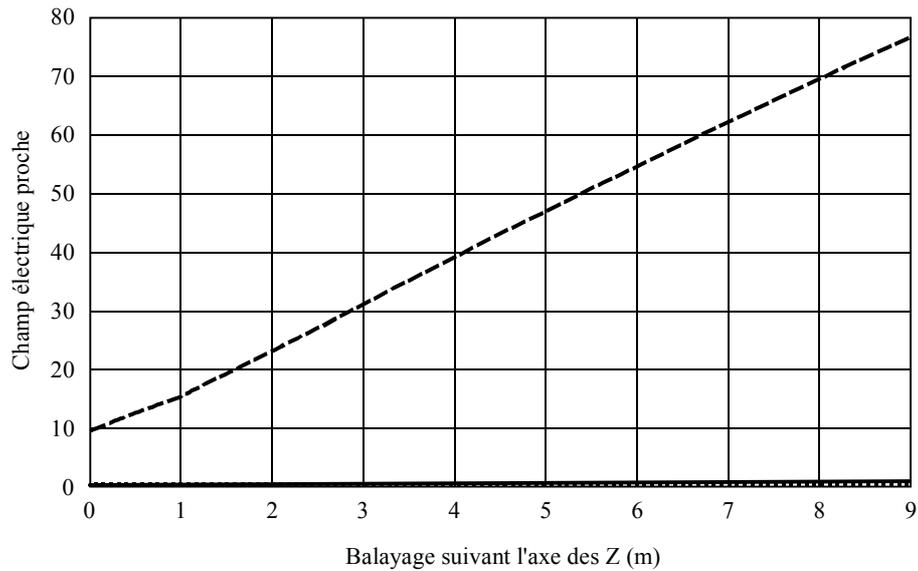
- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- ..... Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13

Rap 2037-28

La composante la plus importante est la composante y. La composante z est plus faible et la composante x est égale à zéro. Sur l'axe horizontal on représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des Y). Z est fixé à 2 m (hauteur au-dessus du sol). L'intensité des composantes du champ H est représentée en A/m sur l'axe vertical.

FIGURE 29

Valeurs calculées du champ E à une distance de 60 m par rapport à l'antenne ( $Y = 60$ ) pour différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage suivant l'axe des Z)



13 MHz, champ électrique proche en fonction de la hauteur à une distance de 60 m par rapport à l'antenne; puissance de l'émetteur: 225 kW au niveau du connecteur d'antenne

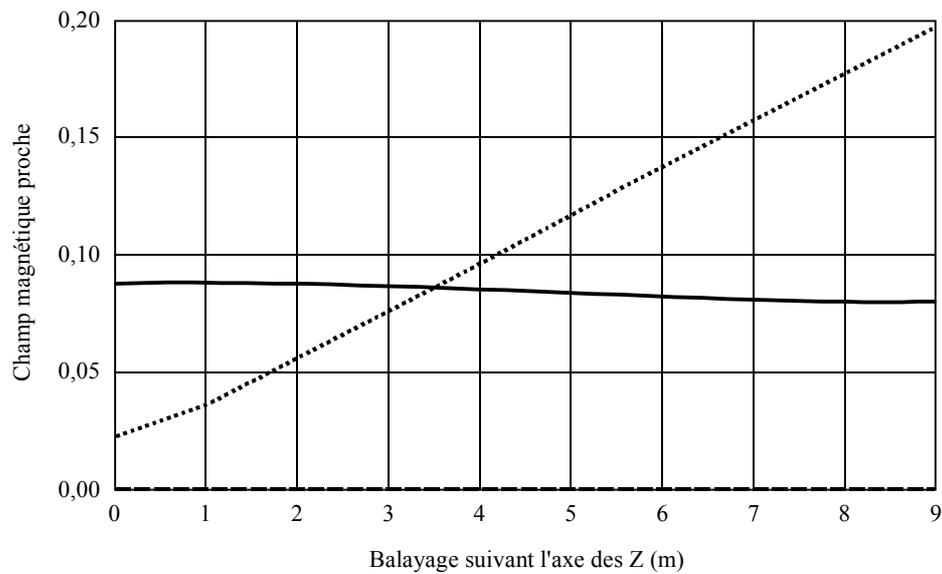
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13
- ..... Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13

Rap 2037-29

La forte corrélation entre les valeurs de E et la hauteur (seule la composante x du champ E est présente) est évidente.

FIGURE 30

Valeurs calculées du champ H à une distance de 60 m de l'antenne ( $Y = 60$ ) pour différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage suivant l'axe des Z)



13 MHz, champ magnétique proche en fonction de la hauteur à une distance de 60 m de l'antenne; puissance de l'émetteur: 225 kW au niveau du connecteur d'antenne

- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13
- ..... Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT13

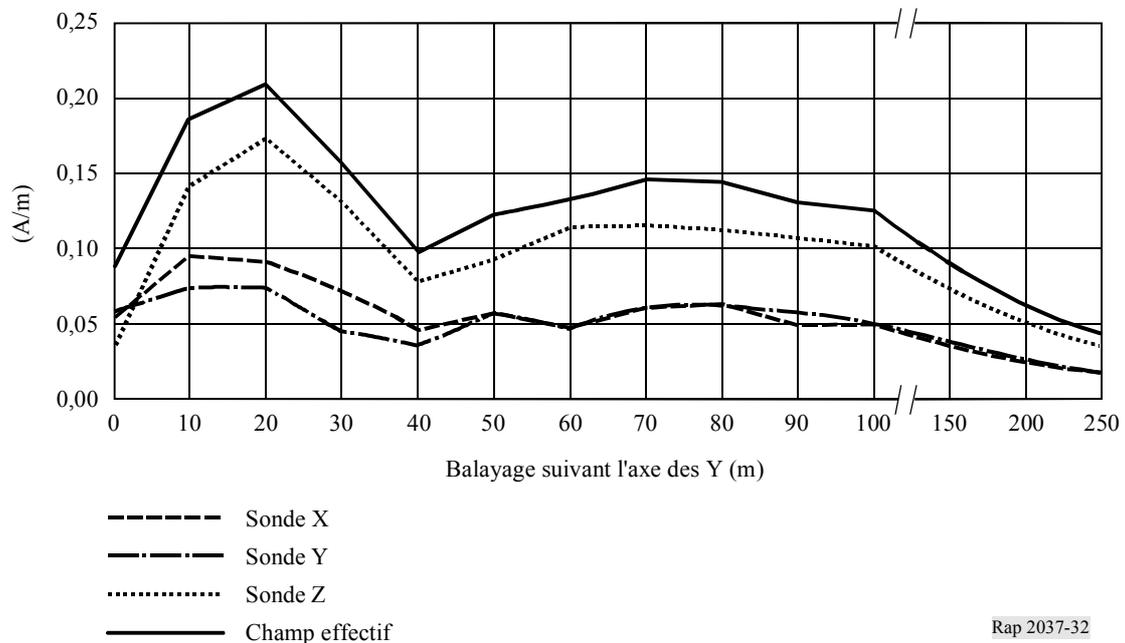
Rap 2037-30

La forte corrélation entre les valeurs de H et la hauteur (les composantes z et y du champ H sont présentes, la valeur de la composante x est constante) est évidente.



FIGURE 32

## Valeurs mesurées du champ H



Sur l'axe horizontal est représentée la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des Y). L'intensité des composantes du champ E est représentée (A/m) sur l'axe vertical. Les trois composantes x, y et z du champ H sont présentes et la ligne supérieure représente la valeur globale.

## 2.2 18 MHz

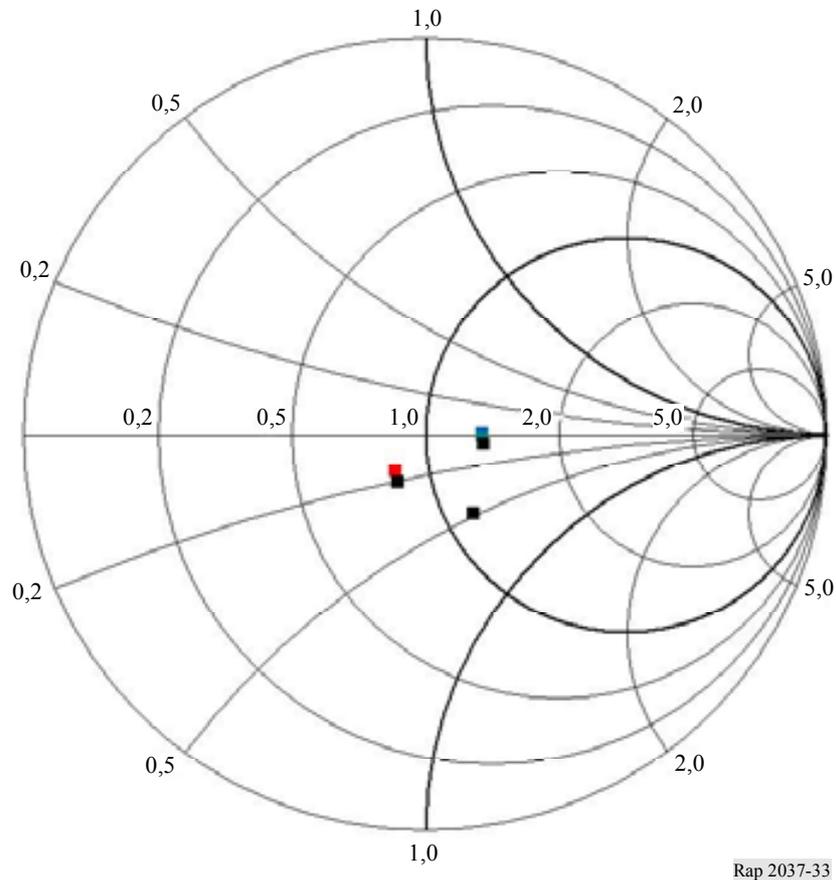
### 2.2.1 Prévisions

#### 2.2.1.1 Notes concernant le modèle

Pour que la correspondance entre le modèle décrit précédemment et le système d'antenne réel soit optimale, il faut connaître la quantité exacte de puissance à l'entrée de chaque doublet, compte tenu des pertes dans la ligne de transmission et des pertes dues aux défauts d'adaptation.

Pour appliquer la tension appropriée à chaque doublet, on a calculé pendant la simulation l'impédance d'entrée de chaque doublet. Les valeurs sont représentées à la Fig. 33.

FIGURE 33

**Impédance d'entrée des doublets normalisée à 180  $\Omega$** 18 MHz, impédance des doublets (normalisée à 180  $\Omega$ )

Pour chaque doublet on a ensuite adopté une seule et même valeur de 180  $\Omega$  pour la résistance, qui est la valeur moyenne obtenue à partir de la simulation. On notera que cette décision peut être à l'origine d'inexactitudes dans les résultats des prévisions.

Grâce aux composantes faiblement réactives de l'impédance d'entrée complexe, il n'a pas été nécessaire d'adapter la puissance de l'émetteur pour compenser les pertes de puissance imputables au défaut d'adaptation et à la réflexion résultante entre l'émetteur et l'antenne.

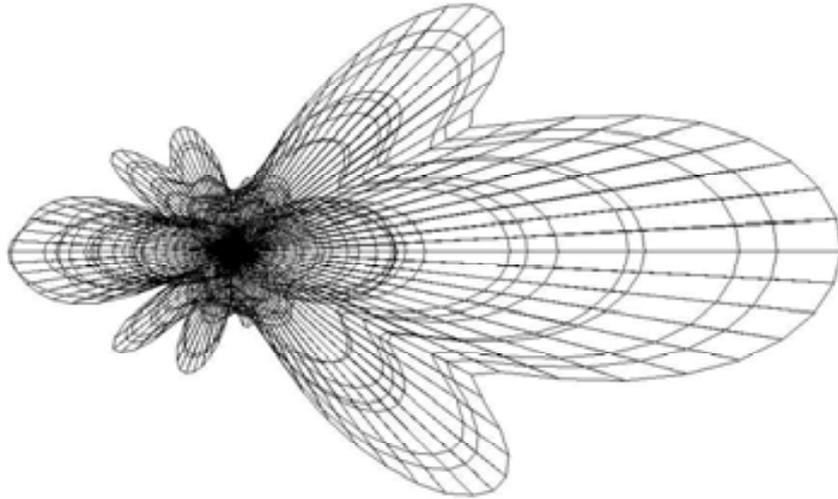
On notera la dispersion faible – mais non inexistante – des valeurs de la résistance à proximité de 180  $\Omega$  et l'absence importante de composantes réactives.

### 2.2.1.2 Evaluations du champ lointain

Pour que la comparaison entre le modèle et les antennes réelles (Fig. 19 et 20) soit optimale, on a calculé les diagrammes de rayonnement. Les résultats font l'objet de la Fig. 34 (plan horizontal), de la Fig. 35 (plan vertical) et de la Fig. 36 (vue frontale).

FIGURE 34

Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal



Rap 2037-34

FIGURE 35

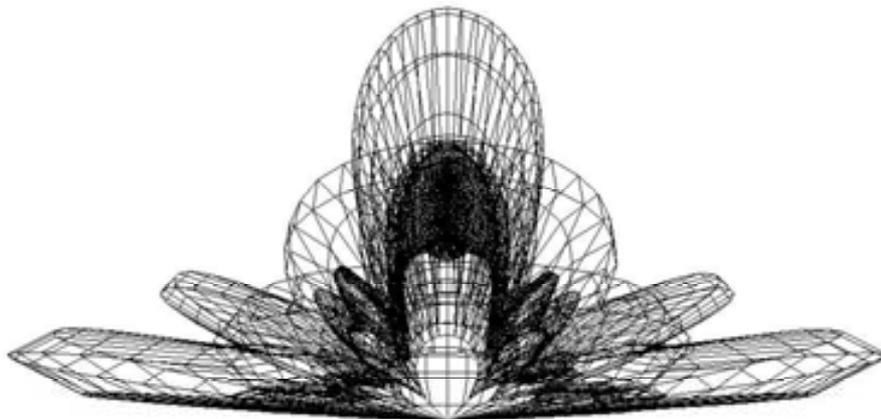
Diagramme de rayonnement dans le plan vertical



Rap 2037-35

FIGURE 36

Diagramme de rayonnement, plan frontal



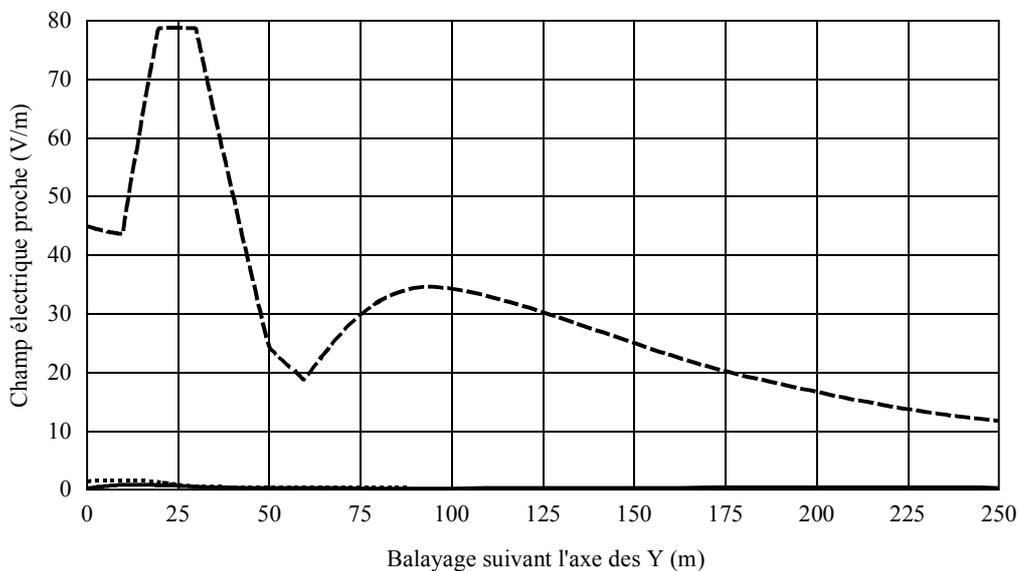
Rap 2037-36

### 2.2.1.3 Résultats des prévisions du champ proche

On a réalisé les prévisions en calculant les composantes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  des champs  $E$  et  $H$  dans la direction du gain maximal de l'antenne (axe  $Y$ ) à une hauteur de 2 m au-dessus du sol (axe  $Z = 2$ ). Les valeurs calculées sont représentées à la Fig. 37 (champ  $E$ ) et à la Fig. 38 (champ  $H$ ). La forte incidence du relief tant sur les mesures que sur les évaluations peut introduire une différence supplémentaire entre les deux résultats. Pour montrer la forte influence du relief, on a également calculé les valeurs des champs  $E$  et  $H$  en faisant varier la hauteur du point d'évaluation par rapport au sol (axe  $Z$ ) de 0 à 9 m, pour une distance fixe de 60 m ( $Y = 60$ ). Les résultats sont illustrés à la Fig. 39 (champ  $E$ ) et à la Fig. 40 (champ  $H$ ).

FIGURE 37

Valeurs calculées du champ E dans la zone de champ proche



18 MHz, champ électrique proche en fonction de la distance; puissance de l'émetteur: 200 kW au niveau du connecteur d'antenne. Hauteur: 2 m par rapport au sol

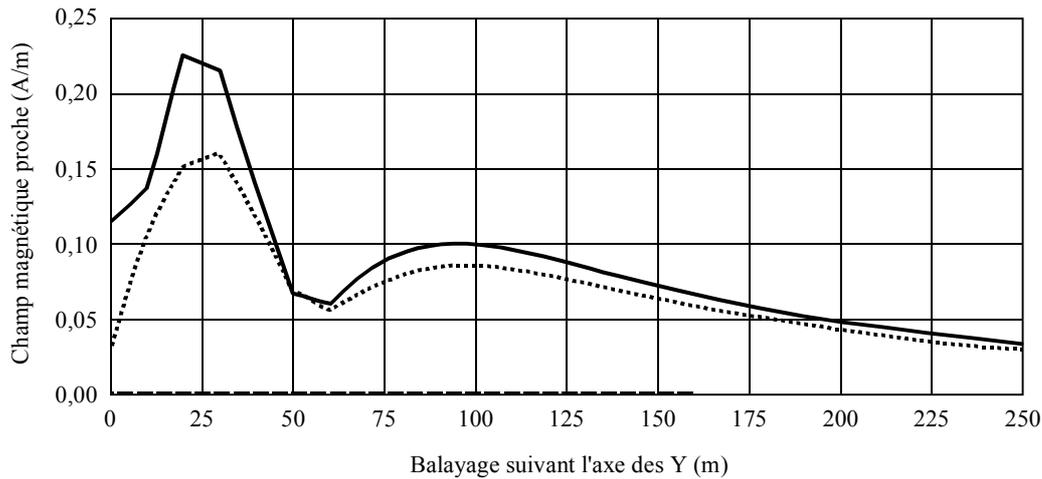
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes:  $X = 0$ ,  $Z = 2$ ; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes:  $X = 0$ ,  $Z = 2$ ; CORT18
- ..... Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes:  $X = 0$ ,  $Z = 2$ ; CORT18

Rap 2037-37

La composante la plus importante est la composante  $x$ . Sur l'axe horizontal on représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des  $Y$ ).  $Z$  est fixé à 2 m (hauteur par rapport au sol). L'intensité des composantes du champ  $E$  est représentée (V/m) sur l'axe vertical.

FIGURE 38

## Valeurs calculées du champ H dans la zone de champ proche



18 MHz, champ magnétique proche en fonction de la distance; puissance de l'émetteur: 200 kW au niveau du connecteur d'antenne. Hauteur: 2 m par rapport au sol

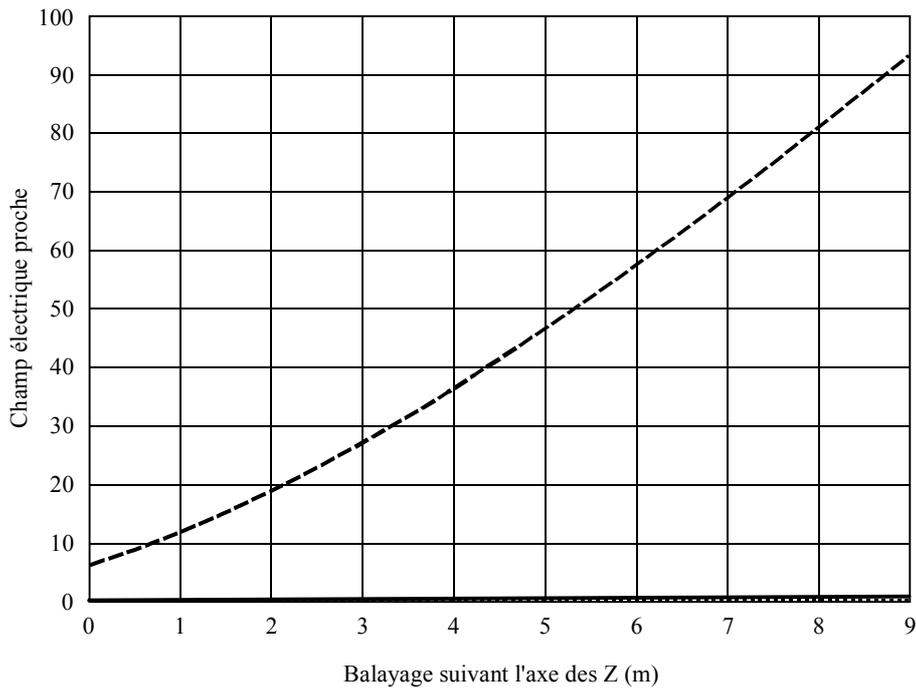
- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- ..... Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18

Rap 2037-38

La composante la plus importante est la composante y. La composante z est plus faible et la composante x est égale à zéro. Sur l'axe horizontal on représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des Y). Z est fixé à 2 m (hauteur au-dessus du sol). L'intensité des composantes du champ H est représentée (A/m) sur l'axe vertical.

FIGURE 39

Valeurs calculées du champ E dans la zone de champ proche à une distance de 60 m par rapport à l'antenne ( $Y = 60$ ) pour différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage suivant l'axe Z)



18 MHz, champ électrique proche en fonction de la hauteur à une distance de 60 m par rapport à l'antenne; puissance de l'émetteur: 200 kW au niveau du connecteur d'antenne

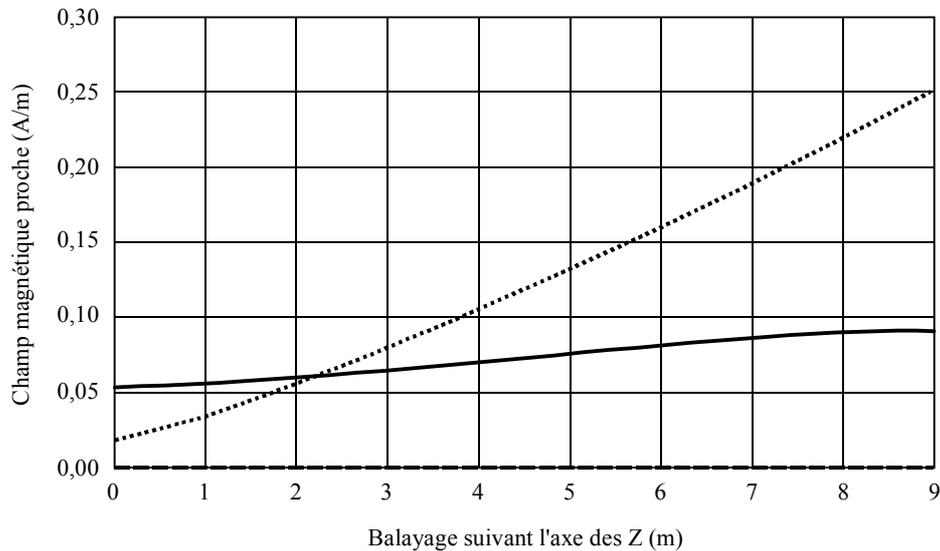
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18
- ..... Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18

Rap 2037-39

La forte corrélation entre les valeurs de E et la hauteur (seule la composante x du champ E est présente) est évidente.

FIGURE 40

Valeurs calculées du champ H dans la zone de champ proche à une distance de 60 m par rapport à l'antenne ( $Y = 60$ ) pour différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage suivant l'axe Z)



18 MHz, champ magnétique proche en fonction de la hauteur à une distance de 60 mètres par rapport à l'antenne; puissance de l'émetteur: 200 kW au niveau du connecteur d'antenne

- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18
- ..... Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes:  $X = 0$ ,  $Y = 60$ ; CORT18

Rap 2037-40

La forte corrélation entre les valeurs de H et la hauteur (les composantes z et y du champ H sont présentes, la valeur de la composante y est constante) est évidente.

## 2.2.2 Mesures

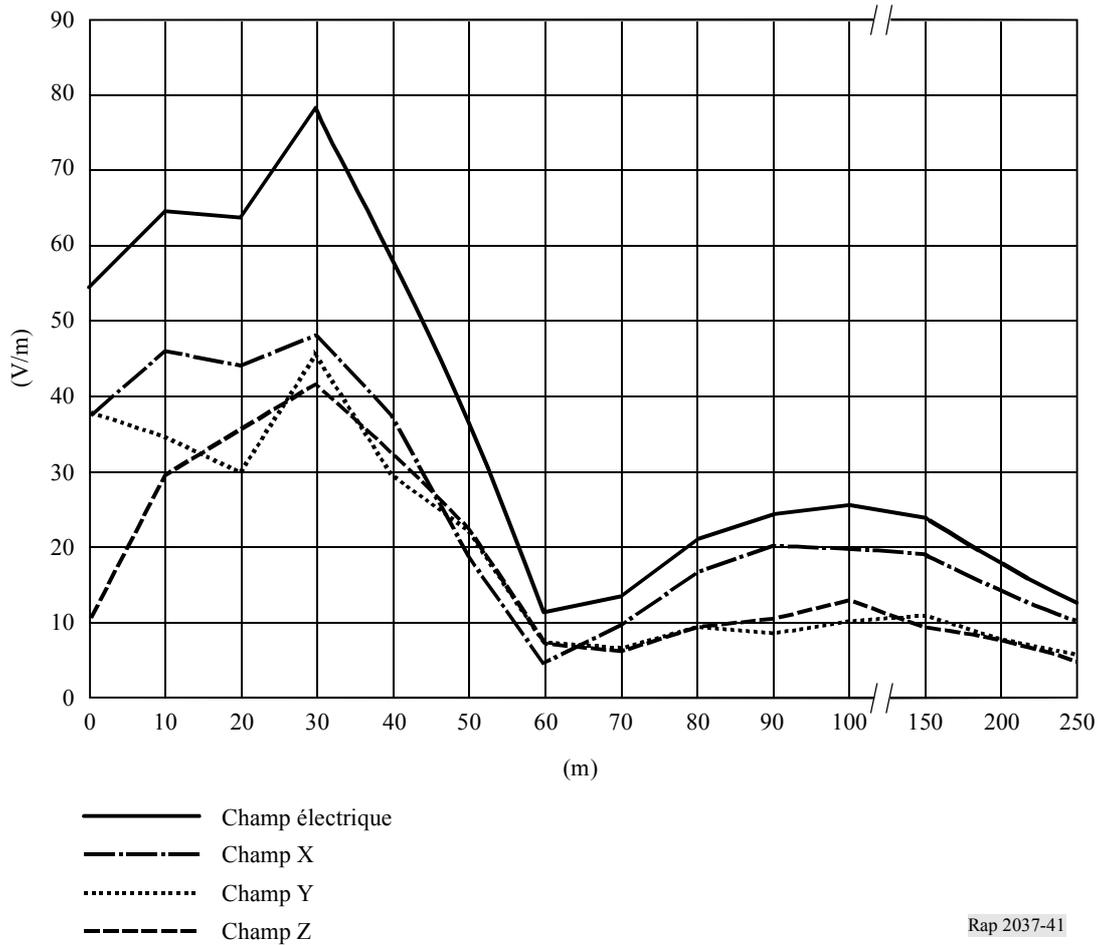
On a effectué les mesures à l'aide d'un mesureur de champ large bande installé sur un chariot électrique déplacé par un opérateur qui se trouve loin du site de l'antenne. On évite ainsi toute sorte de perturbation pour les champs E et H.

### 2.2.2.1 Résultats des mesures

Les valeurs mesurées sont présentées à la Fig. 41 (champ E) et à la Fig. 42 (champ H). Les Fig. 41 et 42 sont directement comparables respectivement avec les Fig. 37 et 38.

FIGURE 41

## Valeurs mesurées du champ E dans la zone de champ proche

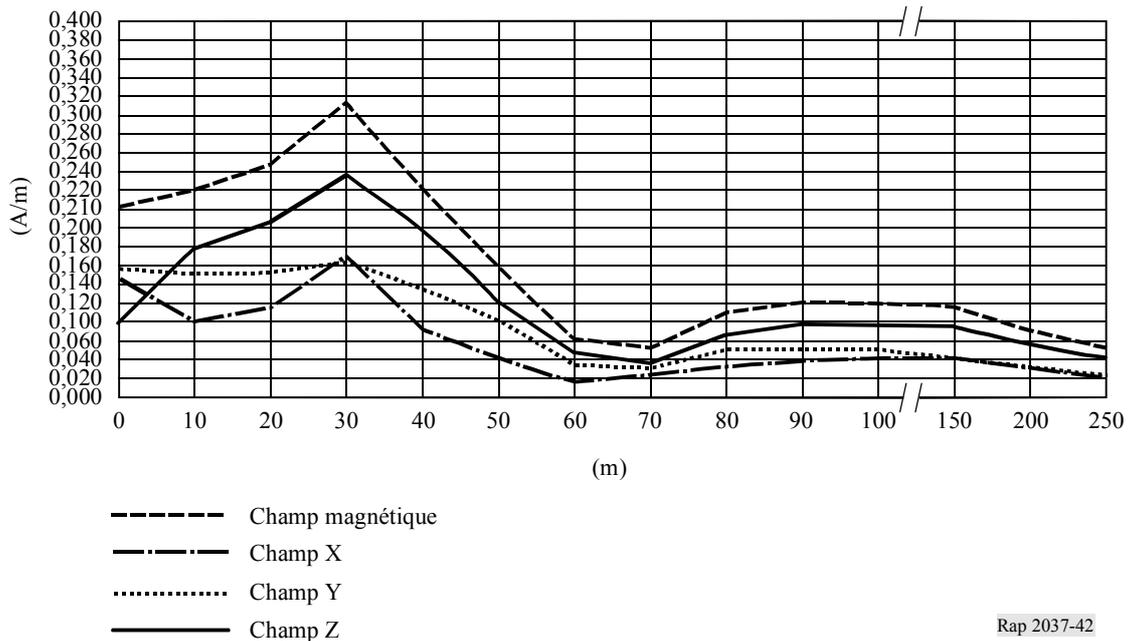


Rap 2037-41

Sur l'axe horizontal est représentée la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage sur l'axe des Y). L'intensité des composantes du champ E est représentée (V/m) sur l'axe vertical. Les trois composantes x, y et z du champ E sont présentes et la ligne supérieure représente la valeur globale.

FIGURE 42

## Valeurs mesurées du champ H dans la zone de champ proche



Rap 2037-42

Sur l'axe horizontal est représentée la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage suivant l'axe des Y). L'intensité des composantes du champ E est représentée (A/m) sur l'axe vertical. Les trois composantes x, y et z du champ H sont présentes et la ligne supérieure représente la valeur globale.

## 2.3 Comparaison entre les mesures et les prévisions du champ dans la zone de champ proche

### 2.3.1 13 MHz

A une distance de moins de 40 m, les prévisions ont donné, pour le champ E et le champ H, des valeurs supérieures aux valeurs mesurées; quoi qu'il en soit, les valeurs maximales de E et H ont été observées à une distance de 10-20 m par rapport au système d'antenne, tant pour les résultats des simulations que pour les mesures.

Aussi bien dans les prévisions que dans les valeurs mesurées, il y a un «minimum» évident à 40 m de l'antenne, plus important dans les prévisions que dans les mesures.

Le second «maximum» atteint sa valeur crête, dans les deux cas, à 75 m de l'antenne; dans ce cas, les valeurs obtenues à partir des simulations sont inférieures aux valeurs mesurées.

A une distance importante de l'antenne (250 m) les prévisions et les valeurs mesurées sont pratiquement les mêmes pour tous les champs.

### 2.3.2 18 MHz

A une distance de moins de 40 m les prévisions ont donné, pour le champ E et le champ H, des valeurs supérieures aux valeurs mesurées; quoi qu'il en soit, les valeurs maximales de E et H ont été observées à une distance de 10-20 m par rapport au système d'antenne, tant pour les résultats des simulations que pour les mesures.

Un second «maximum» est atteint à 100 m tant pour les prévisions que pour les mesures du champ E et du champ H, la valeur mesurée étant inférieure du champ E. A une distance de plus de 60 m de l'antenne on suppose que la valeur du champ H est la même dans les prévisions et dans les mesures.

## 3 Conclusions

La comparaison entre les valeurs mesurées et les valeurs prévisionnelles des champs E et H, à 13 MHz et à 18 MHz, donne des résultats intéressants.

En règle générale, les valeurs ne coïncident pas parfaitement, ce à quoi l'on pouvait s'attendre; toutefois, les écarts ne sont pas très importants, compte tenu de l'incertitude quant à la planéité du sol à proximité de l'antenne (qui n'est pas prise en considération dans les simulations même s'il est évident qu'il y a une corrélation forte entre l'intensité du champ et la hauteur du point de mesure) et de la simplicité imposée du modèle. Les écarts sont plus importants à proximité de l'antenne (le premier maximum est à environ 10 m), du simple au double, puis diminuent en fonction de la distance; à 250 m, les écarts sont quasiment nuls.

Il faut chercher les raisons de ces écarts dans les difficultés liées aux mesures du champ proche, dans l'incertitude inhérente aux appareils de mesure, dans la simplicité du modèle et dans la présence de certains objets à proximité de l'antenne (structures métalliques, les deux croisillons de fixation des doublets et réseau d'adaptation, petit local), autant de paramètres qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle, tout comme le réseau d'adaptation et son rayonnement. Enfin, le terrain a été modélisé avec ses valeurs électriques types.

Pour obtenir la meilleure approximation de la prévision du champ E ou du champ H par un simulateur, il faut faire observer ce qui suit:

*Modèle d'antenne:* les dimensions physiques des éléments rayonnants et des éléments passifs doivent être étudiées avec soin tout comme l'impédance d'entrée complexe du système. Pour simplifier un système complexe, c'est-à-dire un réseau d'éléments rayonnants, il peut être pratique de remplacer le réseau d'adaptation et d'alimentation par un nombre égal de générateurs de tension appliqués à l'entrée de chaque élément rayonnant. Si le réseau d'adaptation n'est pas pris en considération, il faut alors compenser:

- l'éventuel défaut d'adaptation entre les générateurs et les éléments rayonnants en introduisant des éléments d'adaptation artificiels ou des réseaux simples ou bien en adaptant la puissance appliquée à l'émetteur. Le résultat final n'est pas affecté par la présence de petits défauts d'adaptation qu'il n'est, en règle générale, pas nécessaire de compenser.

*Subdivision en tronçons:* il suffit de représenter les systèmes d'antenne filaires par des tronçons d'une longueur maximale de  $\lambda/20$ .

*Modélisation du terrain:* il faut donner les valeurs exactes de la permittivité et de la conductivité, en particulier dans le cas d'un champ E à polarisation horizontale.

*Puissance de l'émetteur*: il est important de tenir compte des pertes dans les lignes de transmission, du réseau d'adaptation, de la résistance des raccords, des désadaptations de charge. Dans certains cas, il est opportun d'ajuster artificiellement la valeur exacte de la puissance pour tenir compte des diverses causes des pertes sans compliquer le modèle du système d'antenne.

*Hauteur des points de mesure par rapport au sol*: dans de nombreux cas ce paramètre est très important si l'on veut faire une comparaison entre les mesures et les prévisions. En fait, on peut observer que la hauteur a une forte incidence sur la valeur des champs et si le terrain est modélisé comme étant plat, on risque d'avoir de grosses erreurs lors de la comparaison avec les mesures. Dans tous les cas où les éléments rayonnants sont à proximité du terrain et où le terrain n'est pas tout à fait plat, il faut être prudent avec les résultats des prévisions.

*Sélection du code*: la simulation basée sur la méthode MOM semble être utile et facile à utiliser dans le cas d'antennes filaires dont on connaît bien les caractéristiques physiques et électriques. Il est possible et tout à fait facile de simplifier le modèle selon un nombre minimum de règles, sans perte de précision des résultats.

## Appendice 3

### Limites et niveaux

#### 1 Autorités de réglementation et autorités consultatives en matière sanitaire

Un certain nombre d'autorités internationales ou nationales s'occupent des aspects sanitaires de l'exposition aux champs électromagnétiques. Cette liste non exhaustive est donnée, à la fin du présent Appendice, pour information.

#### 2 Comparaison entre les limites de base et les niveaux dérivés figurant dans des réglementations largement utilisées

Les directives actuelles normalisées diffèrent pour ce qui est de la définition des groupes de personnes potentiellement exposés (grand public, travailleurs exposés de part leur profession, âge) et/ou du lieu des emplacements considérés (lieux publics, maisons individuelles, enclos, bâtiments à accès restreint).

Il y a également des différences selon les parties du corps considérées.

On compare dans le présent paragraphe:

- La norme de l'IEEE relative aux niveaux de sécurité pour ce qui est de l'exposition de l'homme aux champs électromagnétiques entre 3 kHz et 300 GHz [3].
- Les lignes directrices visant à limiter l'exposition aux champs électrique, magnétique et électromagnétique variant dans le temps (jusqu'à 300 GHz) [4].
- La déclaration du Comité sur les restrictions relatives à l'exposition de l'homme aux champs électromagnétique, statique ou variant dans le temps ainsi qu'aux rayonnements [5].

Le Tableau 5 donne une comparaison approximative entre les groupes et les emplacements retenus dans les normes.

TABLEAU 5

	IEEE/ANSI	ICNIRP	NRPB
Groupes	Non	Grand public Personnes exposées de par leur profession	Adultes et enfants Adultes
Emplacements	Avec protection (personnes exposées sensibilisées au problème) Sans protection (personnes exposées non sensibilisées au problème)	Non	Non

## 2.1 Comparaison des limites biologiques de base

Les normes et les directives donnent des «limites de base» pour le courant de contact, la densité de courant et le taux SAR (voir le Tableau 6) ainsi que les conditions de mesure.

Une directive commune aux normes comparées est que la valeur du taux SAR, corps entier ne doit pas dépasser 4 W/kg.

En appliquant un facteur de sécurité de 10, la limite du taux SAR de base (moyenne du taux SAR, corps entier) est ramenée à 0,4 W/kg. La limite de base du NRPB de 0,4 W/kg est proposée comme niveau maximum autorisé pour une augmentation de température de 1 K.

On notera que la moyenne de la limite de base pour le taux SAR corps entier, est établie sur un intervalle de 6 min. Il y a aussi des limites applicables à une partie spécifique du corps; ce sont les «taux SAR localisés»; étant donné que les effets de résonance peuvent être à l'origine de «points chauds» localisés, ces limites sont supérieures à la valeur moyenne du taux SAR, corps entier.

## 2.2 Comparaison des niveaux limites dérivés pour E et H et des limites de densité de puissance à diverses fréquences

Il est très difficile et impossible dans la pratique de mesurer directement la densité du courant et le taux d'absorption spécifique. Par conséquent, les normes et les directives considérées ici donnent en plus des limites de base des *niveaux dérivés*.

Par ailleurs il est concrètement plus facile de mesurer les grandeurs E et H du champ électromagnétique.

Généralement parlant, le taux SAR est fonction de la fréquence alors que les limites de base figurant dans le Tableau 6 sont supposées être constantes. A l'aide de données pertinentes, la limite du taux SAR peut être transformée en trois grandeurs correspondantes du champ E, H, S.

TABLEAU 6

**Comparaison des restrictions biologiques de base (limites du taux SAR) et  
des niveaux de référence (paramètres en vigueur)**

Paramètre	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB
	Avec protection	Sans protection	Professionnel	Grand public	
Valeur efficace du courant induit ou du courant de contact (mA)	$1\,000 f$ (13a)	$450 f$ (13a)	100 (2)	45 (2)	
	100 (1), (13b)	45 (1), (13b)	40 (3)	20 (3)	
Valeur efficace de la densité de courant (A/m <sup>2</sup> )	$350 f$	$15,7 f$	$10 f$	$2 f$	$10 f$
Zone sur laquelle s'effectue l'intégration (cm <sup>2</sup> )	1	1	1	1	
Temps d'intégration	1 (4)	1 (4)	(4)	(4)	
Moyenne du taux SAR – corps entier (W/kg)	0,4 (5a)	0,08 (5b)	0,4 (5a)	0,08 (5a)	0,4 (5c)
Taux SAR local (W/kg)	8 (13c)	1,6 (13c)	10 (13d)	2 (13d)	10
Masse d'intégration (kg)	0,001 (6)	0,001 (6)	0,001 (5a), (7)	0,01 (5a), (7)	0,01 et 0,1 (N.11) (5a), (10)
Taux SAR local <sup>(7)</sup> (W/kg)	20 (13c)	4 (13c)	20 (13d)	4 (13d)	20
Masse d'intégration (kg)	0,010 <sup>(8)</sup>	0,010 <sup>(8)</sup>	0,001 <sup>(5a), (9)</sup>	0,01 <sup>(5a), (9)</sup>	0,1 <sup>(5a), (9)</sup>
Densité de puissance (W/m <sup>2</sup> )			50 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	10 $68/f^{1,05}$ (12), (13)	100 $68/f^{1,05}$ (12)
Temps d'intégration (m)					

*f*: fréquence (MHz) (sauf indication contraire).

(1) Courant traversant chaque pied. *f*: fréquence (MHz).

(2) Courant induit dans un membre (10-110 MHz).

(3) Courant de contact provenant d'objets conducteurs (100 kHz-110 MHz).

(4) Densité de courant sur 1 cm<sup>2</sup> de tissu.

(5) a) Limites du taux SAR pour un temps d'intégration de six min.

b) Limites du taux SAR pour un temps d'intégration donné dans le Tableau 7.

c) Limite du taux SAR pour un temps d'intégration de 15 min.

(6) Taux SAR localisé sauf pour les mains, les poignets, les pieds et les chevilles (100 kHz-6 GHz).

(7) Taux SAR localisé pour la tête et le tronc (100 kHz-10 GHz).

(8) Taux SAR localisé pour les mains, les poignets, les pieds et les chevilles (100 kHz-6 GHz).

(9) Taux SAR localisé pour les membres (100 kHz-10 GHz).

(10) Taux SAR localisé pour la tête, le cou, le tronc et le fœtus (10 MHz-10 GHz).

(11) 10 g pour la tête et le fœtus; 100 g pour le cou et le tronc.

(12) Pour des fréquences comprises entre 10 et 300 GHz. *f*: fréquence (GHz).

(13) Moyenne établie sur 20 cm<sup>2</sup> de zone exposée.

a)  $3\text{ kHz} < f < 100\text{ kHz}$

b)  $100\text{ kHz} < f < 100\text{ MHz}$

c)  $100\text{ kHz} < f < 6\text{ GHz}$

d)  $100\text{ kHz} < f < 10\text{ GHz}$ .

Les Tableaux 7, 8 et 9 donnent respectivement le niveau maximal de E, H et de la densité de puissance surfacique dans diverses bandes de fréquences comprises entre 1 kHz et 300 GHz. Les limites sont calculées dans l'hypothèse conservatrice d'un couplage électromagnétique optimal entre le champ électromagnétique et le corps.

TABLEAU 7

**Comparaison des niveaux calculés; Champ E (valeurs efficaces V/m)\***

Gamme de fréquences	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB	
	Avec protection	Sans protection	Professionnel	Grand public	Adultes uniquement	Adultes et enfants
0,6-3 kHz						
3-30 kHz	614		610 <sup>(1)</sup>	87	1 000	
30-38 kHz						
38-65 kHz						
65-100 kHz						
100-410 kHz						
410-600 kHz						
600-610 kHz						
610-680 kHz						
680-920 kHz						
0,92-1 MHz						
1-1,34 MHz					600/f	
1,34-3 MHz	614	823,8/f	610/f	87/f <sup>0,5</sup>		
3-10 MHz	1 842/f	823,8/f			60	600/f
10-12 MHz						
12-30 MHz	61,4	27,5	61	28	f <sup>(2)</sup>	50
30-60 MHz						
60-100 MHz						
100-137 MHz						
137-200 MHz						
200-300 MHz					137 <sup>(2)</sup>	0,25 f <sup>(2)</sup>
300-400 MHz						
400-800 MHz						100 <sup>(2)</sup>
0,8-1,1 GHz			3 f <sup>0,5</sup>	1,375 f <sup>0,5</sup>		0,125 f <sup>(2)</sup>
1,1-1,55 GHz						
1,55-2 GHz					194 <sup>(2)</sup>	
2-3 GHz						
3-15 GHz			137	61		
15-300 GHz						

*f*: fréquence (MHz, sauf indication contraire).

\* La moyenne des valeurs devrait être calculée sur un intervalle de 6 min, sauf dans les cas suivants:

- a)  $f^2/0,3$ ;
- b) 30 min.

(1) Cette valeur est comprise entre 0,82 kHz et 1 MHz.

(2) Valeur équivalente à une onde plane du champ E.

TABLEAU 8

Comparaison des niveaux calculés; champ H (valeurs efficaces A/m)<sup>(1), (2)</sup>

Gamme de fréquences	IEEE/ANSI		ICNIRP		NRPB		
	Avec protection	Sans protection	Professionnel	Grand public	Adultes uniquement	Adultes et enfants	
1-3 kHz					64		
3-30 kHz	163						
30-38 kHz							
38-65 kHz							
65-100 kHz				5 <sup>(3)</sup>			
100-140 kHz	16,3/f		1,6/f	0,73/f	18/f <sup>2</sup>		
140-150 kHz							
150-535 kHz							
535-610 kHz							
610-680 kHz							
0,68-1 MHz							
1-1,34 MHz							
1,34-3 MHz							
3-10 MHz							
10-12 MHz							
12-30 MHz					0,16 <sup>(2)</sup>	0,13	
30-60 MHz	16,3/f	158,3/f <sup>1,668</sup> <sup>(1a)</sup>	0,16	0,073	f/377 <sup>(2)</sup>		
60-100 MHz							
100-137 MHz	0,163	0,0729					
137-200 MHz		(1b))					
200-300 MHz						0,36 <sup>(2)</sup>	0,66 × 10 <sup>-3</sup> f
300-400 MHz							
400-800 MHz			0,008f <sup>0,5</sup>	0,0037f <sup>0,5</sup>		0,26	
0,8-1,1 GHz							0,33 × 10 <sup>-3</sup> f
1,1-1,55 GHz							0,33 × 10 <sup>-3</sup> f <sup>(2)</sup>
1,55-2 GHz							
2-3 GHz					0,52		
3-15 GHz			0,36	0,16			
15-300 GHz							

$f$ : fréquence (MHz, sauf indication contraire).

(1) La moyenne des valeurs devrait être calculée sur un intervalle de 6 min, sauf:

- a)  $0,0636 f^{1,337}$  min
- b) 30 min.

(2) Valeur équivalente pour une onde plane, du champ H, basée sur les valeurs de densité de puissance données pour les adultes.

NOTE – Ces valeurs ne sont pas données de la même façon étant donné que les valeurs du champ E et de la densité de puissance sont spécifiées.

(3) Cette valeur s'applique entre 0,8 kHz et 150 kHz.

TABLEAU 9

Comparaison des niveaux dérivés; densité de puissance surfacique ( $W/m^2$ )<sup>(1), (4)</sup>

Gamme de fréquences	IEEE/ANSI <sup>(2)</sup>				ICNIRP		NRPB		
	Avec protection		Sans protection		Professionnel	Grand public	Adultes uniquement	Adultes et enfants	
	Champ E	Champ H	Champ E	Champ H					
<100 Hz									
0,1-1 kHz									
1-3 kHz									
3-30 kHz									
30-100 kHz	1 000	$10 \times 10^6$	1 000	$10 \times 10^6$					
100-410 kHz									
0,41-1 MHz	1 000	$10^5/f^2$	1 000	$10^5/f^2$					
1-1,34 MHz									
1,34-3 MHz	1 000	$10^5/f^2$	$1 800/f^2$ (3), (4a)	$10^5/f^2$ (3)					
3-10 MHz									
10-12 MHz	$9 000/f^2$	$10^5/f^2$	$1 800/f^2$ (3), (4b)	$10^5/f^2$ (3)	10	2	10		
12-30 MHz									
30-60 MHz									
60-100 MHz	10	$10^5/f^2$	2 (3), (4b)	$(9,4 \cdot 10^6)/f^{8,336}$ (3), (4c)			$2,7 \times 10^{-3} f^2$		
100-137 MHz									
137-200 MHz	10		2 (4b)						
200-300 MHz									
300-400 MHz							50	$0,165 \times 10^{-3} f^2$	
400-800 MHz								26	
0,8-1,1 GHz			$f/150$		$f/40$	$f/200$	$41 \times 10^{-6} f^2$	$41 \times 10^{-6} f^2$	
1,1-1,55 GHz	$f/30$		(4b)						
1,55-2 GHz									
2-3 GHz									
3-15 GHz	100		$f/150$ (4d)		50	10			
15-300 GHz	$100^{(4e)}$								

(1)  $f$ : fréquence (MHz, sauf indication contraire).

(2) Au-dessous de 100 MHz, les valeurs équivalentes à une onde plane sont données pour le champ E et le champ H.

(3) Telles qu'elles sont données par certains mesureurs disponibles dans le commerce.

(4) La moyenne des valeurs devrait être calculée sur un intervalle de 6 min, sauf:

- $f^2/0,3$  min
- 30 min
- $0,0336 f^{1,337}$  min
- $90 000/f$  min
- $616 000/f^{1,2}$  min.

### 3 Valeurs du champ à déterminer

A titre préliminaire, à l'aide des données indiquées dans les Tableaux au § 3.2 du présent Appendice, on donne respectivement dans les Fig. 43 et 44 l'ensemble des valeurs du champ électrique et du champ magnétique.

FIGURE 43  
Gamme des valeurs du champ électrique calculées à partir des tableaux donnés dans l'Appendice 3

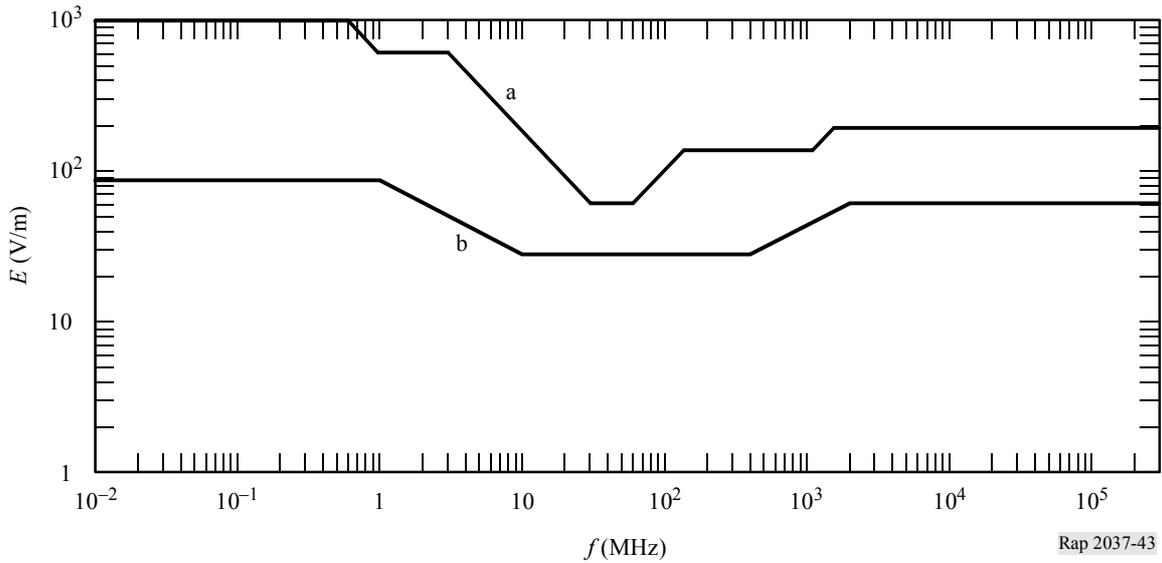
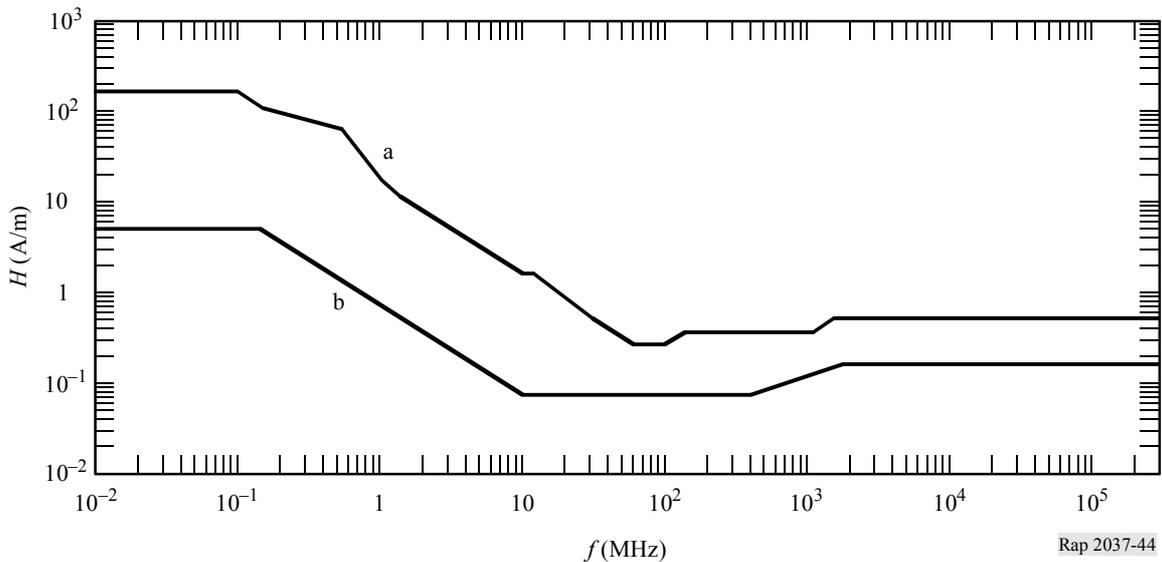


FIGURE 44  
Gamme des valeurs du champ magnétique calculées à partir des tableaux donnés dans le présent Appendice



Les administrations ne devraient pas utiliser ces courbes/graphiques pour élaborer leurs réglementations nationales. Ces courbes représentent en effet une vue composite des limites actuellement décrites et ne manqueront pas d'évoluer avec le temps. En tant que telles, elles sont purement illustratives de la méthode qu'une administration pourrait utiliser pour élaborer des normes utiles.

Il faut également reconnaître que les résultats d'études indépendantes ne sont pas totalement cohérents et qu'en conséquence leur interprétation par les autorités responsables s'est traduite dans le passé et continuera de se traduire dans l'avenir par des exigences différentes selon les pays.

Les courbes «a» et «b» représentent respectivement la limite supérieure et la limite inférieure de certaines recommandations connues en vigueur relatives aux niveaux d'exposition aux rayonnements électromagnétiques (présentés dans le présent Appendice comme exemple). Toutes les courbes établies par les autorités formulant une telle recommandation sont situées entre ces limites et toute courbe entre les courbes «a» et «b» devrait permettre l'exploitation des services de radiodiffusion.

Les courbes «a» et «b» représentent respectivement la limite supérieure et la limite inférieure de certaines recommandations connues en vigueur relatives aux niveaux d'exposition aux rayonnements électromagnétiques (présentés dans l'Appendice comme exemple). Toutes les courbes établies par les autorités formulant une telle recommandation sont situées entre ces limites et toute courbe entre les courbes «a» et «b» devrait permettre l'exploitation des services de radiodiffusion.

Les écarts entre les niveaux maximum suggérés à la même fréquence (Fig. 43 et 44) dépendent des différentes conditions prises en considération par les différentes autorités proposant les limites.

#### **4 Procédures numériques et calcul des grandeurs du champ électromagnétique**

Dans un petit nombre de cas relativement simples, on peut résoudre les problèmes liés à la diffusion et aux rayonnements électromagnétiques en utilisant des procédures analytiques en boucle fermée. Toutefois, pour résoudre des problèmes généraux, à géométrie variable, il faut recourir à des procédures de calcul numériques tournant sur des ordinateurs puissants.

Il existe des procédures numériques fonction de la gamme de fréquences considérée et des dimensions des structures géométriques utilisées, pour calculer les grandeurs du champ électromagnétique.

Parmi ces différentes méthodes nous avons opté pour la méthode MOM qui est utilisée pour la conception de systèmes d'antenne de radiodiffusion et pour calculer les champs électromagnétiques résultants.

La méthode MOM est beaucoup utilisée pour calculer la distribution du taux SAR dans le modèle dit «par blocs».

On calcule les intensités du champ électrique dans le corps en résolvant l'équation intégrale du champ électrique à l'aide des équations de Maxwell.

Le logiciel utilisé est: NEC – WIN Professional V 1.1 (1997) by Nittany Scientific, inc. – [www.nittany-scientific.com](http://www.nittany-scientific.com).

## **5 Liste de certaines réglementations nationales**

### **5.1 Administrations**

#### **5.1.1 Australie**

Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA) Radiation Protection Standard RPS-3, Radiation Protection Standard – Maximum exposure levels to radiofrequency fields –3 kHz to 300 GHz.

#### **5.1.2 Brésil**

Resolution N° 303/202 – Regulamento sobre Limitacao da Exposicao a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequencias entre 9 kHz e 300 GHz.  
[www.anatel.gov.br/biblioteca/Templates/Resolucoes/resolucoes.asp](http://www.anatel.gov.br/biblioteca/Templates/Resolucoes/resolucoes.asp).

#### **5.1.3 France**

Décret N° 2002-775 du 03.05.2002 relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques.

#### **5.1.4 Allemagne**

Bundesministeriu fuer Wirtschaft und Arbeit [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de).

#### **5.1.5 Italie**

DPCM 8 July 2003. [www.parlamento.it/parlam/leggi/elelenum.htm](http://www.parlamento.it/parlam/leggi/elelenum.htm).

#### **5.1.6 Nouvelle-Zélande**

#### **5.1.7 Etats-Unis d'Amérique**

[www.fcc.gov/oet/rfsafety/](http://www.fcc.gov/oet/rfsafety/).

#### **5.1.8 Etat de la Cité du Vatican**

Delibera del 16/12/1992 No: 225620.

#### **5.1.9 Japon**

Radio Law (Law No. 131 of May 2, 1950), Article 30.

The Regulations for Enforcement of the Radio Law (Radio Regulatory Commission Rules No. 14 of November 30, 1950), Article 21-3 and Annex Table 2-3-2.

Web site: <http://www.tele.soumu.go.jp/e/ele/index.htm> (en anglais)

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/index.htm> (en japonais)

(Les articles de la Loi et des Réglementations ne sont disponibles qu'en japonais. Certains rapports destinés aux ministres sont disponibles en anglais.)

- 6 Liste de certains organes de réglementation et de certains organes consultatifs**
- 6.1 Comité des composants électriques, CENELEC [4]**
- 6.2 German Commission for Electrical and Electronic Information Technologies, DKE**
- 6.3 Union européenne – Recommandation du Conseil de l'Union européenne L 199, 12 juillet 1999.**
- 6.4 Institut des ingénieurs en électricité et en électronique/American National Standards Institute (USA) (IEEE)/(ANSI)**
- 6.5 Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP)**
- 6.6 Commission électrotechnique internationale (CEI)**
- 6.7 Organisation mondiale de la santé (OMS)**
- 6.8 National Radiological Protection Board (NRPB)**
- 6.9 Institut européen des normes de télécommunication (ETSI)**

## **Appendice 4**

### **Autres méthodes d'évaluation**

#### **1 Dosimétrie**

La dosimétrie permet d'établir la relation entre les valeurs extérieures du champ (mesurées en dehors du corps) et les valeurs du champ électrique, de la densité de courant induit et du taux d'absorption d'énergie mesurées dans les tissus. La dosimétrie expérimentale et numérique a été utilisée en complément. Ces deux méthodes nécessitent des approximations de la simulation de l'exposition de l'homme aux rayonnements électromagnétiques; toutefois, la mise au point de matériaux assimilables à des tissus et de sondes peu intrusives dans le domaine expérimental ainsi que l'utilisation de modèles anatomiquement réalistes à des fins de calcul ont permis de mieux comprendre l'interaction des champs électromagnétiques avec le corps.

Aux faibles fréquences la densité de courant est la grandeur qui se rattache le plus clairement aux effets biologiques, mais c'est le taux SAR qui devient la grandeur la plus importante lorsque les fréquences augmentent et se rapprochent de longueurs d'onde comparables aux dimensions du corps humain.

Dans la plupart des situations d'exposition, on ne peut déduire le taux SAR que des valeurs mesurées du champ dans l'environnement en utilisant des modèles dosimétriques. Aux fréquences inférieures à 100 MHz, on a utilisé des techniques non intrusives pour mesurer le courant induit et, dans des champs uniformes étendus, les champs électriques extérieurs ont été rapportés au courant induit et exprimés en fonction de la fréquence. Aux fréquences de résonance du corps, on observe des expositions non négligeables dans la pratique dans la zone de champ proche réactif où il est difficile d'établir le couplage entre le champ incident et le corps en raison de l'absence d'uniformité du champ et de la variation de l'alignement entre le champ et le corps. Par ailleurs, il peut y avoir des augmentations localisées de la densité de courant et du taux d'absorption spécifique, dans certaines parties du corps, car la section transversale géométrique des tissus plus conducteurs est restreinte.

On peut calculer les grandeurs dosimétriques en utilisant des procédures numériques adaptées et des modèles de calcul du corps humain. Par ailleurs, ces grandeurs peuvent être mesurées à l'aide de modèles physiques adaptés (fantômes).

## 2 Mesure du taux SAR

Le taux SAR (W/kg) est la grandeur limite de base figurant dans la plupart des réglementations et des normes relatives à l'exposition aux rayonnements électromagnétiques. Ce taux est une mesure du débit avec lequel l'énergie électromagnétique est absorbée par unité de masse de tissu.

Le taux SAR peut être défini comme étant la valeur normalisée sur l'ensemble de la masse corporelle (valeur moyenne du taux SAR, corps entier) ou la valeur localisée sur un petit volume de tissu (taux SAR localisé).

Il est possible d'obtenir le taux SAR à partir des grandeurs internes, de trois façons comme indiqué par l'équation suivante:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\sigma \rho}$$

où:

$E$ : valeur du champ électrique interne dans les tissus corporels ( $V/m^{-1}$ )

$\sigma$ : conductivité des tissus corporels ( $S/m^{-1}$ )

$\rho$ : densité des tissus corporels ( $kg/m^3$ )

$C_i$ : capacité thermique des tissus corporels ( $J/kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

$dT/dt$ : dérivée temporelle de la température dans les tissus corporels ( $^\circ C/s^{-1}$ )

$J$ : valeur de la densité de courant induit dans les tissus corporels ( $A/m^2$ ).

Le taux SAR local dans une masse incrémentielle ( $dm$ ) est défini comme étant la dérivée temporelle de l'énergie absorbée incrémentielle ( $dW$ ) divisée par la masse:

$$SAR = \frac{dW}{dm \, dt}$$

La valeur de cette grandeur est importante à deux égards: la distribution non uniforme résultante de l'absorption d'énergie dans le cas d'une exposition à une onde plane uniforme et l'absorption d'énergie localisée découlant de champs non uniformes à proximité immédiate d'une source d'exposition.

Les réglementations ou les normes relatives aux expositions contiennent des limites dérivées du champ électrique et du champ magnétique. Le concept de dosimétrie permet d'avoir l'assurance que le respect des niveaux dérivés (externes) garantira le respect des limites de base du taux SAR. On peut toutefois utiliser également les mesures du taux SAR externe ou interne pour vérifier le respect des normes. Dans le cas d'une exposition d'une partie du corps au champ proche, les champs électromagnétiques extérieurs peuvent être difficiles à mesurer ou peuvent dépasser les limites dérivées, même si le taux SAR local est en dessous des limites de base. Dans ces cas, il faut procéder à des mesures du taux SAR interne dans des modèles corporels. Les méthodes les plus importantes de mesure du taux SAR seront décrites ci-après.

## 2.1 Mesures du champ électrique

Le taux SAR est également proportionnel au carré de la valeur efficace du champ électrique  $E$  (V/m) mesurée à l'intérieur du tissu exposé:

$$SAR = \sigma E^2 / \rho$$

où:

$\sigma$  (S/m): conductivité et

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>): masse volumique du tissu, à la position considérée.

On peut, à l'aide d'une sonde du champ électrique isotrope, déterminer le taux SAR local à l'intérieur d'un corps irradié. En déplaçant la sonde et en répétant les mesures du champ électrique dans l'ensemble ou sur une partie du corps, on peut déterminer la distribution du taux SAR ainsi que les valeurs moyennes du taux SAR pour le corps entier ou pour une partie du corps. Une mesure du champ électrique ne prend que quelques secondes, ce qui signifie qu'il est possible de déterminer des distributions tridimensionnelles du taux SAR avec une résolution spatiale élevée et un temps de mesure raisonnable (en général moins d'une heure).

## 2.2 Mesures de la température

Le taux SAR est proportionnel au taux initial d'augmentation de la température  $dT/dt$  (C/s) dans le tissu d'un objet exposé:

$$SAR = c \Delta T / \Delta t$$

où  $c$  est la capacité thermique spécifique du tissu. A l'aide de certaines sondes de température, on peut déterminer le taux SAR local à l'intérieur d'un modèle corporel irradié. On utilise une ou plusieurs sondes pour déterminer l'augmentation de la température  $\Delta T$  pendant une brève durée d'exposition  $\Delta t$  (en général moins de 30 s pour éviter tout transfert de chaleur). On fait une approximation du taux initial d'augmentation de la température à l'aide de  $\Delta T / \Delta t$ , et on calcule la valeur du taux SAR local pour chaque position de mesure. En répétant les mesures de température sur l'ensemble ou sur une partie du corps, on peut déterminer la distribution du taux SAR ainsi que les valeurs moyennes du taux SAR pour le corps entier ou pour une partie du corps.

Les mesures tridimensionnelles de la distribution du taux SAR prennent beaucoup de temps en raison du nombre important de points de mesure. Pour que le temps de mesure soit raisonnable, il faut limiter le nombre de points de mesure, ce qui signifie qu'il est très difficile de mesurer avec précision des distributions du taux SAR fortement non uniformes. La précision des mesures de température peut également être affectée par la conduction et la convection thermiques pendant les mesures ou entre les mesures.

### 2.3 Mesures calorimétriques

La valeur moyenne du taux SAR pour le corps entier peut être déterminée à l'aide de méthodes calorimétriques. Dans une mesure calorimétrique normale, un modèle corporel grandeur nature ou mis à l'échelle, en équilibre thermique, est irradié pendant un certain temps. On utilise un calorimètre pour mesurer le flux de chaleur dégagé par le corps jusqu'à ce que le modèle retrouve l'équilibre thermique. On divise ensuite l'énergie absorbée totale ainsi obtenue par la durée d'exposition et la masse du modèle corporel pour obtenir la valeur du taux SAR pour le corps entier. Il existe une technique calorimétrique utilisant deux calorimètres et deux modèles corporels identiques. L'un des modèles est irradié et l'autre est utilisé comme référence thermique. On peut ainsi réaliser les mesures dans des conditions thermiques qui sont moins bien maîtrisées qu'une mesure calorimétrique normale.

Les mesures calorimétriques permettent de déterminer assez précisément le taux SAR pour le corps entier mais ne donnent aucune information sur la distribution interne de ce taux. Pour obtenir des résultats précis, il faut une quantité suffisante de déposition d'énergie. La durée totale de la mesure, qui est déterminée par le temps nécessaire pour parvenir à l'équilibre thermique après l'exposition, peut aller jusqu'à plusieurs heures. On peut mesurer le taux SAR pour une partie du corps en utilisant des fantômes de parties du corps et de petits calorimètres.

## 3 Mesure des courants corporels

Les dispositifs de mesure des courants corporels peuvent être classés en deux catégories:

- les dispositifs de mesure du courant circulant du corps vers le sol;
- les dispositifs de mesure du courant de contact.

### 3.1 Courants corporels induits

Les courants corporels internes résultent d'une exposition de l'ensemble ou d'une partie du corps à des champs RF en l'absence de contact avec des objets autres que le sol.

Les deux principales techniques utilisées pour mesurer les courants corporels sont les transformateurs de courant (solénoïdes) à pinces qui servent à mesurer le courant qui circule dans les membres et les systèmes à plaques parallèles qui permettent de mesurer les courants qui traversent les pieds avant d'être absorbés par la terre.

On a mis au point des transformateurs de courant à pinces qui peuvent être portés.

Le mesureur est monté directement sur le transformateur ou connecté à l'aide d'une liaison en fibres optiques. Un écran permet de visualiser la circulation du courant dans le membre auquel est fixé le transformateur de courant. La détection du courant dans ces unités peut se faire à l'aide de techniques à bande étroite, par exemple des analyseurs de spectre ou bien des récepteurs syntonisés (qui offrent l'avantage de pouvoir déterminer la distribution fréquentielle du courant induit dans des environnements multisources) ou bien de techniques large bande qui utilisent la détection par diodes ou la conversion thermique.

On a mis au point des instruments indiquant les valeurs efficaces vraies en présence d'ondes à fréquences multiples et/ou à modulation d'amplitude.

La réponse dans les fréquences supérieures des transformateurs de courant est habituellement limitée à environ 100 MHz mais on a utilisé des transformateurs à noyau d'air (par opposition aux transformateurs à noyau de ferrite) pour élargir la réponse dans les fréquences supérieures de ces instruments. Les transformateurs à noyau d'air sont plus légers et donc utiles pour des mesures sur de longues durées mais ils sont beaucoup moins sensibles que les transformateurs à noyau de ferrite.

Les systèmes à plaques parallèles sont une alternative aux dispositifs à pinces. Dans ces systèmes, le courant corporel circule à travers les pieds jusqu'à la plaque supérieure conductrice et passe par un détecteur de courant connecté entre les deux plaques pour atteindre la terre. On peut déterminer la circulation du courant entre la plaque supérieure et la plaque-socle en mesurant la chute de tension RF à travers une résistance à faible impédance. On peut aussi utiliser un transformateur de courant RF à petite ouverture ou un thermocouple sous vide pour mesurer le courant circulant dans le conducteur connecté entre les deux plaques.

Il existe des instruments présentant une courbe de réponse en fréquence plate entre 3 kHz et 100 MHz.

Plusieurs éléments doivent être pris en considération lors du choix d'un instrument de mesure du courant induit.

Premièrement, les mesureurs sur lesquels la personne se tient debout subissent l'influence des courants de déplacement induits qui sont produits par les champs électriques aboutissant sur la plaque supérieure. Des études ont montré que le fonctionnement des mesureurs en présence d'une personne n'est pas perturbé par les erreurs apparentes relevées en l'absence d'une personne.

Deuxièmement, la somme des courants circulant dans les deux chevilles qui sont mesurés à l'aide d'un dispositif fixé sur les chevilles a tendance à être légèrement supérieure à la valeur correspondante que l'on obtient avec un mesureur à plaques parallèles. L'importance de cet écart, qui est fonction de la fréquence RF et de la géométrie du mesureur, ne sera vraisemblablement pas pertinente. Cela étant, le transformateur de courant est la méthode la plus précise pour évaluer les courants circulant dans les membres. La méthode de mesure précise peut dépendre des exigences fixées par les directives en matière de protection qui servent de référence pour les évaluations de conformité.

Troisièmement, il faut examiner la possibilité de mesurer des courants induits dans les membres dans des conditions de mise à la terre ou à la masse réalistes comme celles que l'on trouve dans la pratique. En particulier, le degré différent de contact électrique entre la plaque-socle et la plaque supérieure du système à plaques parallèles ainsi que la surface effective au sol peuvent affecter la circulation apparente du courant vers la terre.

Des mesures peuvent être faites à l'aide d'antennes qui sont conçues pour être équivalentes à une personne. Cela permet d'utiliser une méthode normalisée et d'effectuer les mesures du courant sans qu'il soit nécessaire que des personnes soient exposées à des courants ou des champs potentiellement dangereux.

### 3.2 Mesures du courant de contact

Le dispositif de mesure du courant doit être placé entre la main de la personne et l'objet conducteur. Il peut s'agir d'une sonde métallique (zone de contact précise) dont une extrémité est dans la main de la personne et l'autre extrémité est en contact avec l'objet conducteur. On peut utiliser un détecteur de courant à pinces (transformateur de courant) pour mesurer le courant de contact qui circule dans la main en contact avec l'objet conducteur.

Il existe d'autres méthodes:

- mesure de la différence de potentiel (chute de tension) à travers une résistance non inductive (plage de résistance de 5 à 10  $\Omega$ ) connectée en série entre l'objet et la sonde métallique que la personne tient dans sa main;
- un milliampère-mètre thermocouple connecté directement en série.

Les connexions de câblage et le mesureur de courant doivent être placés de façon à ce que les brouillages et les erreurs dues aux courants «captés» soient minimales.

Lorsque l'on s'attend à des courants excessivement élevés, un réseau électrique de résistances et de condensateurs peut simuler l'impédance équivalente du corps.

### **3.3 Mesures de la tension de contact**

La tension de contact (tension en l'absence de charge) est mesurée à l'aide d'un voltmètre ou d'un oscilloscope adapté à la gamme de fréquences considérée. Les dispositifs de mesure sont connectés entre l'objet conducteur chargé par la tension induite par le champ et le potentiel de référence (sol). L'impédance d'entrée du voltmètre ne doit pas être inférieure à 10 k $\Omega$ .

## **Appendice 5**

### **Dispositifs électromédicaux**

#### **1 Dispositifs électromédicaux**

La compatibilité électromagnétique (CEM) est un problème général qui se pose pour les équipements électroniques et, en particulier, pour les équipements électromédicaux. En effet, les champs électromagnétiques s'ils sont suffisamment élevés peuvent perturber les dispositifs électroniques. Les risques liés aux problèmes CEM et l'importance de ces risques dépendent de la distance entre l'antenne rayonnante et le dispositif, de la puissance de l'émetteur, de la fréquence des ondes, du type de modulation du signal rayonné, de l'effet de couplage des câbles ainsi que l'immunité propre des dispositifs électroniques aux brouillages.

Un filtrage RF ou un filtrage électronique approprié permet en général de réduire, voire de supprimer les brouillages RF que subissent les dispositifs électromédicaux. Les techniques appliquées qui découlent de celles qui sont couramment utilisées pour la CEM sont appropriées. Des limites particulières s'appliqueront peut être aux dispositifs médicaux, implantés ou non, ainsi qu'aux instruments médicaux; elles pourront être sensiblement inférieures aux limites générales fixées pour la population.

#### **1.1 Dispositifs médicaux implantés ou portatifs**

Les champs électromagnétiques peuvent causer des brouillages RF aux dispositifs médicaux implantés ou portatifs actifs.

Les pompes à insuline et les simulateurs cardiaques appartiennent à cette catégorie et, demain, le nombre de ces dispositifs va peut être augmenter. La gamme et le nombre de nouveaux dispositifs différents (par exemple, moniteurs portatifs, prothèses oculaires ou orthopédiques) semblent s'élargir. D'une façon générale, les stimulateurs cardiaques et d'autres appareils médicaux risquent d'être brouillés par les champs électromagnétiques rayonnés. Toutefois, dans le cas d'appareils électromédicaux implantés, les problèmes de brouillage RF ne sont pas encore totalement résolus car les constructeurs et les fournisseurs ne sont pas pleinement sensibilisés au problème.

## Appendice 6

### Références bibliographiques

- [1] CEI [6 octobre 2000] IEC Committee Draft (CD) 85/214/CD: Measurement and evaluation of high frequency (9 kHz to 300 GHz) electromagnetic fields with regard to human exposure.
  - [2] UER [novembre 2001] BPN 023: Radio frequency radiation: Exposure limits and their implication for broadcasters. Union européenne de radiodiffusion.
  - [3] ANSI/IEEE [1992] Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1/D1.4.
  - [4] ICNIRP [avril 1998] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, Vol. 74, 4, p. 494-522.
  - [5] NRPB [1993] Board Statement on restrictions on human exposure to static and time varying electromagnetic fields and radiation. Doc. NRPB, Vol. 4, 5.
  - [6] CENELEC [21 novembre 2003] Draft prEN 50413: Basic Standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz-300 GHz).
  - [7] IEEE. IEEE Std C95.3: IEEE recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz-300 GHz.
-