

Recommandation UIT-R BS.1698-1

(05/2023)

Série BS: Service de radiodiffusion sonore

**Évaluation des champs électromagnétiques
provenant des systèmes d'émission de
radiodiffusion par voie hertzienne de Terre
pour estimer l'effet de l'exposition des
personnes aux émissions non ionisantes**

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

Séries	Titre
BO	Diffusion par satellite
BR	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
BS	Service de radiodiffusion sonore
BT	Service de radiodiffusion télévisuelle
F	Service fixe
M	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
P	Propagation des ondes radioélectriques
RA	Radio astronomie
RS	Systèmes de télédétection
S	Service fixe par satellite
SA	Applications spatiales et météorologie
SF	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
SM	Gestion du spectre
SNG	Reportage d'actualités par satellite
TF	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2024

© UIT 2024

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R BS.1698-1

Évaluation des champs électromagnétiques provenant des systèmes d'émission de radiodiffusion par voie hertzienne de Terre pour estimer l'effet de l'exposition des personnes aux émissions non ionisantes¹

(2005-2023)

Champ d'application

La présente Recommandation est destinée à servir de base pour calculer et estimer les valeurs des champs électromagnétiques produits par une station de radiodiffusion à des distances particulières du site de l'émetteur. En utilisant ces informations, les organisations responsables peuvent ensuite élaborer des méthodes d'évaluation appropriées des niveaux susceptibles d'être utilisées pour protéger les personnes exposées aux champs électromagnétiques. Les niveaux effectifs à appliquer dans toute réglementation dépendront naturellement des décisions prises par les organismes de santé responsables, nationaux et internationaux.

Mots clés

Limites d'exposition, champs électromagnétiques RF, évaluation de l'exposition, estimation de l'exposition, systèmes d'émission de radiodiffusion de Terre

Abréviations/Glossaire

EMF	champ électromagnétique (<i>electromagnetic fields</i>)
ERP	puissance apparente rayonnée (<i>effective radiated power</i>) par rapport à un doublet demi-onde
HF	haute fréquence (<i>high frequency</i>) (également appelée ondes courtes)
HR, HRS	antennes rideaux en ondes décamétriques (<i>HF curtain antennas</i>); hauteur (H), rangées (R), pivotable (S)
ICNIRP	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (<i>international commission on non-ionizing radiation protection</i>), organisation non gouvernementale officiellement reconnue par l'OMS
LF	basse fréquence (<i>low frequency</i>) (également appelée ondes longues)
MF	fréquence moyenne (<i>medium frequency</i>) (également appelée ondes moyennes)
MOM	méthode des moments (<i>method of moments</i>)
RF	fréquence radio (<i>radio frequency</i>)
RMS	moyenne quadratique (<i>root mean square</i>)
SAR	taux d'absorption spécifique (<i>specific absorption rate</i>)
Z ₀	impédance caractéristique de l'espace libre (<i>characteristic impedance of free space</i>)

¹ Conformément aux numéros **1.137** et **1.138** du RR, le terme «émission» désigne le «rayonnement» produit à partir d'une station radioélectrique d'émission.

Recommandations, Rapports et Manuels de l'UIT correspondants*Recommandations UIT-R – Série BS: Service de radiodiffusion (sonore)*

- BS.705 Caractéristiques et diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception en ondes décamétriques
- BS.1195 Caractéristiques des antennes d'émission en ondes métriques et décimétriques
- BS.1386 Caractéristiques et diagrammes de rayonnement des antennes d'émission et de réception en ondes décamétriques et kilométriques

Rapport UIT-R – Série SM: Gestion du spectre

- SM.2452 Mesure des champs électromagnétiques pour évaluer l'exposition des personnes

Manuel UIT-R – Commission d'études 1: Gestion du spectre

Manuel sur le contrôle du spectre (Section 5.6, «Mesure des rayonnements non ionisants»)

Recommandations UIT-T – Série K: Protection contre le brouillage

- K.52 Lignes directrices relatives aux valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques
- K.61 Directives pour la mesure et la prédiction numérique des champs électromagnétiques pour l'observation des limites d'exposition humaines aux rayonnements par les installations de télécommunication
- K.70 Techniques de limitation de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques au voisinage de stations de radiocommunication
- K.83 Surveillance des niveaux des champs électromagnétiques
- K.91 Guide d'évaluation et de surveillance de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radioélectriques
- K.100 Mesure des champs électromagnétiques radiofréquence pour déterminer si les limites d'exposition des personnes sont respectées lorsqu'une station de base est mise en service
- K.113 Établissement de cartes de niveaux des champs électromagnétiques radiofréquence
- K.121 Orientations en matière de gestion de l'environnement pour respecter les limites des champs électromagnétiques radioélectriques applicables aux stations de base de radiocommunication
- K.122 Niveaux d'exposition à proximité immédiate des antennes de radiocommunication
- K.145 Évaluation et gestion du respect des limites d'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquence pour les personnes travaillant au niveau des sites et des installations de radiocommunication

UIT-D Question 7/2 – Stratégies et politiques concernant l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques:

Rapport final sur la Question 7/2 de l'UIT-D, octobre 2021

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que l'énergie radioélectrique de niveau élevé peut avoir des effets dangereux sur le corps humain;
- b) que l'énergie radioélectrique peut induire des potentiels électriques nuisibles dans les matériaux conducteurs;
- c) que l'énergie radioélectrique de niveau élevé peut avoir des effets indirects sur la santé en cas d'interférence avec des dispositifs médicaux;
- d) que l'énergie radioélectrique peut entraîner la combustion involontaire de matières inflammables ou explosives;
- e) que les autorités compétentes déterminent actuellement les niveaux d'exposition et les potentiels électriques dangereux en termes de contenu spectral, d'intensité, d'effets cumulatifs, etc.;
- f) que les autorités compétentes déterminent actuellement les zones où les champs de radiofréquences et les potentiels électriques dépassent les niveaux de sécurité;
- g) que des personnes non associées à de tels systèmes peuvent être exposées accidentellement à des champs électromagnétiques ou à des potentiels électriques;
- h) que les exploitants de systèmes de radiodiffusion de Terre peuvent être amenés à travailler à proximité immédiate de la source de ces émissions de fréquences radio,

recommande

d'utiliser l'Annexe 1 de la présente Recommandation pour évaluer les champs électromagnétiques produits par les systèmes d'émission de radiodiffusion de Terre, afin d'évaluer l'exposition des personnes aux rayonnements non ionisants.

Annexe 1

Évaluation des champs électromagnétiques provenant des systèmes d'émission de radiodiffusion par voie hertzienne de Terre pour estimer l'effet de l'exposition des personnes aux émissions non ionisantes

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Annexe 1 – Évaluation des champs électromagnétiques provenant des systèmes d'émission de radiodiffusion par voie hertzienne de Terre pour estimer l'effet de l'exposition des personnes aux émissions non ionisantes.....	3
1 Introduction	6
2 Caractéristiques des champs électromagnétiques	6
2.1 Caractéristiques générales du champ électromagnétique	6
2.2 Niveaux d'exposition au champ à proximité d'antennes de radiodiffusion.....	10

2.3	Champ de fréquences mixtes	13
2.4	EMF à l'intérieur des bâtiments	13
3	Calcul.....	14
3.1	Procédures.....	14
3.2	Solutions fermées.....	14
4	Mesures.....	15
4.1	Procédures.....	15
4.2	Instruments	16
4.3	Comparaison entre prévisions et mesures.....	19
5	Précautions à prendre dans les stations d'émission de radiodiffusion et à proximité de celles-ci.....	19
5.1	Précautions à prendre pour limiter les effets directs sur la santé des émissions RF de haut niveau	19
5.2	Précautions à prendre pour limiter les risques d'exposition indirecte aux fréquences radio.....	21
Pièce jointe 1 à l'Annexe 1 – Exemples de valeurs calculées du champ à proximité d'antennes de radiodiffusion.....		23
1	Exemple A – Courbes des champs électrique et magnétique.....	23
2	Exemple B – Détermination du champ magnétique dans la zone de champ proche d'antennes de forte puissance en ondes hectométriques/kilométriques.....	29
3	Exemple C – Champ électromagnétique proche des antennes-rideaux d'émission en ondes décamétriques.....	30
3.1	Introduction.....	30
3.2	Champ électrique et champ magnétique proches des antennes-rideaux.....	30
4	Conclusions	33
Pièce jointe 2 à l'Annexe 1 – Comparaison entre prévisions et mesures		33
1	Avant-propos	33
1.1	Modèle utilisé pour le système d'antenne	34
1.2	Avantages et limites du modèle de système d'antenne	35
2	Comparaison entre prévisions et mesures	37
2.1	Analyse numérique des structures filaires – Exemple.....	37
2.2	18 MHz.....	45

2.3	Comparaison entre les mesures et les prévisions de l'intensité du champ dans la zone proche	52
3	Conclusions	52
	Pièce jointe 3 à l'Annexe 1 – Limites et niveaux internationaux	53
	Pièce jointe 4 à l'Annexe 1 – Complément d'information sur la modulation.....	55
1	Caractéristiques des émissions radioélectriques	55
2	Expression de la puissance de l'émetteur et de l'intensité du champ en fonction du type de modulation	57
	Pièce jointe 5 de l'Annexe 1 – Méthodes d'évaluation supplémentaires.....	59
1	Procédures numériques.....	59
1.1	Méthode des moments (MOM)	60
1.2	Méthode de transformation de Fourier rapide/gradient conjugué (TFR/CG).....	60
1.3	Méthode de la différence finie dans le domaine temporel (FDTD).....	60
1.4	Méthode multipolaire multiple (MMP)	60
1.5	Méthode d'impédance	60
2	Calculs d'intensité du champ	61
2.1	Analyse numérique des structures filaires – Exemple	61
3	Dosimétrie	63
3.1	Calculs du taux d'absorption spécifique (SAR)	64
3.2	Mesures SAR	64
4	Mesure du courant corporel.....	66
4.1	Courant corporels induits.....	66
4.2	Mesure du courant de contact	67
4.3	Mesure de la tension au contact.....	68
	Pièce jointe 6 à l'Annexe 1 – Dispositifs électromédicaux implantés et portables.....	68
1	Dispositifs électromédicaux	68
2	Dispositifs implantés et portables.....	68
	Pièce jointe 7 de l'Annexe 1 – Références supplémentaires	69

1 Introduction

La question des effets de l'exposition électromagnétique a été étudiée pendant de nombreuses années et on s'est efforcé de quantifier certaines limites susceptibles d'être utilisées pour protéger l'homme contre des effets indésirables. Les études effectuées dans de nombreux pays par diverses organisations ont abouti à diverses réglementations administratives. Il est à noter et compréhensible qu'aucune norme unique n'ait émergé de tous les efforts déployés à cet égard.

L'Organisation mondiale de la santé (OMS) note [6] que de nombreux pays adhèrent actuellement aux lignes directrices recommandées par:

- la Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP); et
- l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens, par l'intermédiaire du Comité international sur la sécurité électromagnétique (IEEE ICES).

La présente Recommandation est destinée à servir de base pour calculer et estimer les valeurs de l'exposition aux champs électromagnétiques produits par une station de radiodiffusion à des distances particulières du site de l'émetteur. En utilisant ces informations, les organisations responsables peuvent ensuite élaborer des techniques de mesure appropriées qui peuvent être utilisées pour garantir que les niveaux d'EMF protègent les personnes contre une exposition indésirable à des émissions nocives. Les valeurs effectives à appliquer dans toute réglementation dépendront naturellement des décisions prises par les organismes de santé responsables, nationaux et internationaux.

Il convient de noter que la présente Recommandation UIT-R et les Recommandations UIT-T traitent de sujets analogues, mais mettent l'accent sur des aspects différents du même sujet général. Par exemple, les Recommandations UIT-T K.52 – Lignes directrices relatives aux valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques et UIT-T K.61 – Directives pour la mesure et la prédiction numérique des champs électromagnétiques pour l'observation des limites d'exposition humaines aux rayonnements des installations de télécommunication. Voir la section «Recommandations, Rapports et Manuels connexes de l'UIT» pour les informations complémentaires les plus pertinentes.

2 Caractéristiques des champs électromagnétiques

2.1 Caractéristiques générales du champ électromagnétique

La présente section donne un aperçu général des caractéristiques particulières des champs électromagnétiques (EMF) qui intéressent la présente Recommandation, notamment la distinction entre champ proche et champ lointain. Des équations simples permettent de calculer la densité de puissance et l'intensité du champ dans le champ lointain et les termes de polarisation et de diagrammes de brouillage sont définis en conclusion dans cette section.

2.1.1 Composantes du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique rayonné par une antenne se compose de diverses composantes du champ électrique et magnétique, qui s'affaiblissent en fonction de la distance r par rapport à la source. Les composantes principales sont:

- le champ lointain (Fraunhofer), également appelé champ de rayonnement, dans lequel l'amplitude des champs diminue dans des conditions d'espace libre, à un taux de $1/r$;
- le champ proche rayonnant (Fresnel), également appelé champ inductif. La structure du champ inductif dépend fortement de la forme, de la taille et du type de l'antenne, bien que divers critères aient été établis et soient couramment utilisés pour spécifier ce comportement;

- le champ proche réactif (Rayleigh), également appelé champ quasi statique, qui décroît au taux de $1/r^3$.

Étant donné que les composantes inductives et quasi statiques s'affaiblissent rapidement lorsque la distance par rapport à la source d'émission augmente, elles n'ont d'importance qu'au voisinage de l'antenne d'émission, c'est-à-dire dans la région dite de champ proche.

Le champ de rayonnement, en revanche, est l'élément dominant dans la région dite de champ lointain. C'est le champ de rayonnement qui transporte effectivement un signal de radio ou de télévision de l'émetteur vers un récepteur distant.

2.1.2 Champ lointain

Dans la région de champ lointain, le champ électromagnétique est principalement à ondes planes. Cela signifie que les champs électrique et magnétique sont en phase et que leurs amplitudes ont un rapport constant. De plus, les champs électriques et magnétiques sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre, dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation.

On suppose souvent que les conditions de champ lointain s'appliquent à des distances supérieures à $2D^2/\lambda$, où D est la dimension linéaire maximale de l'antenne et λ la longueur d'onde.

Toutefois, il faut faire preuve de prudence lorsqu'on applique cette condition aux antennes de radiodiffusion pour les raisons suivantes:

- elle découle de considérations relatives aux antennes planes;
- on suppose que D est grand par rapport à λ .

Lorsque les conditions ci-dessus ne sont pas remplies, il convient d'utiliser une distance supérieure à 10λ pour le champ lointain; voir aussi l'Annexe A de la CEI 62232 [5].

2.1.2.1 Densité de puissance

Le vecteur densité de puissance, le vecteur de Poynting S , d'une fonction EMF est donné par le produit vectoriel des composantes électrique, E , et magnétique, H , du champ:

$$S = E \times H \quad (1)$$

En champ lointain, dans des conditions idéales où aucune influence du sol ou des obstacles n'est importante, cette expression peut être simplifiée car les champs électrique et magnétique, ainsi que la direction de propagation, sont mutuellement orthogonaux. Par ailleurs, le rapport entre les amplitudes du champ électrique, E , et du champ magnétique, H , est une constante Z_0 , appelée impédance caractéristique de l'espace libre¹ et qui est d'environ 377Ω (ou $120\pi \Omega$).

Ainsi, en champ lointain, la densité de puissance, S , en espace libre est donnée par l'équation scalaire suivante:

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

La densité de puissance, à n'importe quelle distance donnée et dans n'importe quelle direction, peut être calculée dans le champ lointain à l'aide de l'équation suivante:

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

où:

S : densité de puissance (W/m^2) dans une direction donnée

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

- P : puissance (W) fournie à la source d'émission, dans l'hypothèse d'un système sans perte
- G_i : gain de l'antenne de la source d'émission dans la direction considérée, par rapport à une antenne isotrope
- r : distance (m) de la source d'émission.

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

Pour les densités de puissance dans d'autres directions, il faut tenir compte du diagramme d'antenne.

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 gain d'antenne G_i par le produit $G_r \cdot G_a$, comme dans l'équation (4). Le facteur pertinent G_r 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	Gain isotrope (dBi)	Applications types pour lesquelles le type d'antenne de référence est pertinent
Antenne isotrope	1,0	0,0	Radiodiffusion à ondes décimétriques
Doublet demi-onde	1,64	2,15	Radiodiffusion en ondes métriques et décimétriques
Antenne unipolaire courte	3,0	4,80	Radiodiffusion en ondes kilométriques et hectométriques

Ainsi, lorsque le gain de l'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 par rapport à un doublet demi-onde.

Ainsi, 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 par rapport à une antenne unipolaire courte.

2.1.2.2 Intensité de champ

Les équations (2) à (10) supposent des conditions d'espace libre en ondes planes (champ lointain) et ne sont pas applicables aux calculs de champ proche.

Si l'on insère l'équation (2) dans l'équation (3) pour éliminer S et si l'on introduit un facteur C pour tenir compte de la caractéristique directionnelle de la source d'émission, on obtient l'équation (7) pour le champ électrique (E) dans le champ lointain d'une source d'émission:

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

où:

E : intensité du champ électrique (V/m)

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

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

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

Si le gain de l'antenne est exprimé par rapport à un doublet demi-onde ou à une antenne unipolaire courte, plutôt que par rapport à une antenne isotrope, il convient d'utiliser respectivement les facteurs G_d et G_m à la place de G_i , comme indiqué dans les équations (8) et (9).

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

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

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

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

où:

E : intensité du champ électrique (V/m)

H : intensité du champ magnétique (A/m)

$Z_0 = 377 \Omega$ (120π), l'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 le champ lointain. En champ proche, il existe une relation de phase et d'amplitude arbitraire entre les vecteurs champs électrique et magnétique, et les champs varient considérablement d'un point à l'autre. Par conséquent, pour déterminer la nature du champ proche, il faut calculer ou mesurer à la fois la phase et l'amplitude du champ électrique et du champ magnétique. Dans la pratique, cependant, cela peut s'avérer très difficile à réaliser.

2.1.3.1 Densité de puissance et intensité de champ

Il n'est pas facile de déterminer le vecteur de Poynting en champ proche en raison de la relation arbitraire de phase et d'amplitude mentionnée précédemment. Les amplitudes E et H ainsi que leur relation de phase doivent être mesurées ou calculées séparément en chaque point, ce qui rend la tâche particulièrement complexe et longue.

À l'aide de formules analytiques, l'estimation de l'intensité du champ en champ proche n'est possible que pour des émetteurs idéaux simples tels que le doublet élémentaire. Dans le cas de systèmes d'antenne plus complexes, il faut utiliser d'autres techniques mathématiques pour estimer les niveaux d'intensité de champ dans la région de champ proche. Ces autres techniques permettent des estimations relativement précises de l'intensité du champ, de la densité de puissance et d'autres caractéristiques pertinentes du champ, même dans la région complexe du champ proche.

2.1.4 Polarisation

La polarisation est définie comme étant la direction du vecteur champ électrique par rapport à la direction de propagation du front d'onde.

En radiodiffusion, différents types de polarisation sont utilisés. Les principaux types de polarisation sont vertical et horizontal (par rapport à un front d'onde qui se déplace parallèlement à la surface de la Terre), bien que d'autres types de polarisation soient utilisés, 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. Il peut être nécessaire de tenir compte de la modulation lors des mesures ou des calculs pour déterminer si les limites sont dépassées ou non.

Les radiodiffuseurs utilisent depuis de nombreuses années des techniques de commande du niveau de porteuse dépendante de la modulation (MDCL) telles que la compression-extension de la modulation d'amplitude (AMC) afin de réduire leurs coûts de transmission. Lorsque de telles techniques ont été utilisées, les évaluations des champs électromagnétiques devraient être conduites de la même manière qu'une émission AM avec la porteuse à sa sortie AM nominale.

Pour une transmission AM ordinaire, la sortie RF de crête est liée à la profondeur de modulation. La modulation produit souvent un signal variant en amplitude et en fréquence. C'est pourquoi il faut généralement établir une moyenne temporelle pour déterminer les valeurs à utiliser dans les mesures et les calculs. Cette exigence est également reconnue dans les normes pertinentes. Le Règlement des radiocommunications (RR) (Volume 2, Appendice 1) classe les émissions des émetteurs radioélectriques en fonction des largeurs de bande requises et des caractéristiques fondamentales et facultatives de l'émission. Voir la Pièce jointe 4 pour plus de détails sur la manière de traiter différents types de modulation.

2.1.6 Diagrammes de brouillage

Les structures naturelles et artificielles peuvent réémettre un champ EMF. Le champ rerayonné s'ajoute vectoriellement au champ direct. Il peut en résulter des diagrammes de brouillage composés de maxima et de 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 petite et donc plus les maxima et minima sont proches spatialement. Aux fréquences de télévision en ondes décimétriques, les maxima et minima locaux ne peuvent être séparés que de quelques dizaines de centimètres.

Plusieurs configurations se chevauchent dans le cas de sources d'émission multiples, par exemple lorsque plusieurs canaux de radio et de télévision sont transmis à partir du même site.

2.2 Niveaux d'exposition au champ à proximité d'antennes de radiodiffusion

Le présent paragraphe examine les niveaux d'intensité de champ observés à proximité d'antennes de radiodiffusion types en ondes kilométriques/hectométriques, décamétriques, métriques, décimétriques, centimétriques et millimétriques.

2.2.1 Bandes d'ondes kilométriques/hectométriques (150-1 605 kHz)

En ondes kilométriques et hectométriques, les fréquences sont inférieures aux fréquences de résonance du corps entier. Dans le cas d'effets directs des champs EMF, les niveaux limites (également appelés niveaux «dérivés») pour les valeurs du champ électrique E et du champ magnétique, H , sont relativement élevés. Toutefois, dans de nombreux cas, des valeurs élevées ne

sont présentes qu'à proximité immédiate de l'antenne d'émission. Cela est particulièrement vrai à l'extrémité inférieure de la plage LF/MF et pour les normes/lignes directrices qui ont spécifié des niveaux dérivés plus élevés. À l'extrémité supérieure de la bande, toutefois, les distances correspondantes peuvent atteindre quelques centaines de mètres. Il faut bien comprendre que cet accroissement de distance est dû, du moins en partie, à la réduction des niveaux de référence à l'extrémité supérieure de la bande d'ondes hectométriques. Pendant les transmissions, l'accès au mât/pylône doit être évité en raison des champs élevés et du risque de choc électrique.

2.2.2 Bandes d'ondes décamétriques (3-30 MHz)

Les mesures indiquent que dans de vastes zones autour d'une station d'émission HF de forte puissance, le champ électromagnétique dépassera les niveaux de champ électrique calculés, en particulier à proximité des lignes d'alimentation en fils aériens. Dans de nombreuses stations de radiodiffusion, ces lignes d'alimentation sont gainées pour réduire le champ EMF, mais cela n'est pas possible autour des antennes d'émission elles-mêmes. Ainsi, certaines parties du terrain contenant les antennes devront devenir des «zones d'exclusion» et il faudra prévoir des calendriers de maintenance pour éviter les moments où les antennes émettent. Cela sera difficile sur de nombreuses stations en ondes décamétriques où, pour des raisons de programmation, les configurations de champs EMF peuvent changer toutes les 15 minutes. Le champ devant une antenne en ondes décamétriques a tendance à augmenter avec la hauteur au-dessus du sol. Cela s'explique en partie par le fait que l'angle d'élévation du faisceau principal est d'environ 10 à 15 degrés, mais essentiellement par les conditions aux limites à la surface du sol. La plupart des antennes de radiodiffusion en ondes décamétriques sont polarisées horizontalement, auquel cas le champ électrique au sol serait nul pour une terre conductrice à l'infini. Dans la pratique cependant, en raison de la conductivité finie du sol, il existe une petite composante horizontale du champ électrique.

Il est important de se rendre compte que le champ proche d'un réseau d'antennes en ondes décamétriques peut s'étendre sur une distance considérable. Cela n'est pas seulement dû aux dimensions des antennes, mais aussi au fait que le terrain accidenté peut donner lieu à une très grande ouverture effective de l'antenne. Il en résulte que les mesures du champ tombent en dessous des niveaux calculés en des emplacements proches de l'antenne, puis augmentent à nouveau lorsque la distance par rapport à l'antenne augmente. Toutefois, une fois que l'on entre dans la région de champ lointain, les niveaux du champ suivent un schéma normal décroissant à mesure que la distance par rapport à l'antenne augmente.

Au voisinage d'un réseau rideau en ondes décamétriques à polarisation horizontale, il ne faut pas supposer que les champs EMF sont nécessairement copolaires, on peut aussi trouver des composantes à polarisation verticale; c'est-à-dire qu'aucune hypothèse ne peut être faite quant à la polarisation des risques RF apparaissant dans le champ proche.

2.2.3 Bandes d'ondes métriques/décimétriques (30 MHz-3 GHz)

Normalement, sur les sites de radiodiffusion à forte puissance en ondes métriques/décimétriques, les antennes sont généralement situées à environ 100 m au-dessus du sol et montées sur des mâts ou des pylônes autoporteurs. Au niveau du sol, les champs sont donc relativement faibles, en raison de la distance par rapport à l'antenne et aussi de l'étroitesse du faisceau émis dans le plan vertical.

2.2.4 SHF (3-30 GHz) et EHF (30-300 GHz)

Les bandes de fréquences 11,7-12,5, 40,5-41, 41-42,5 GHz et 74-76 GHz sont attribuées au service de radiodiffusion. À ces fréquences, l'affaiblissement de propagation exige que les émetteurs de radiodiffusion de Terre soient proches des récepteurs.

Les sous-sections suivantes décrivent les systèmes utilisés en radiodiffusion.

2.2.4.1 Définitions de zone de champ

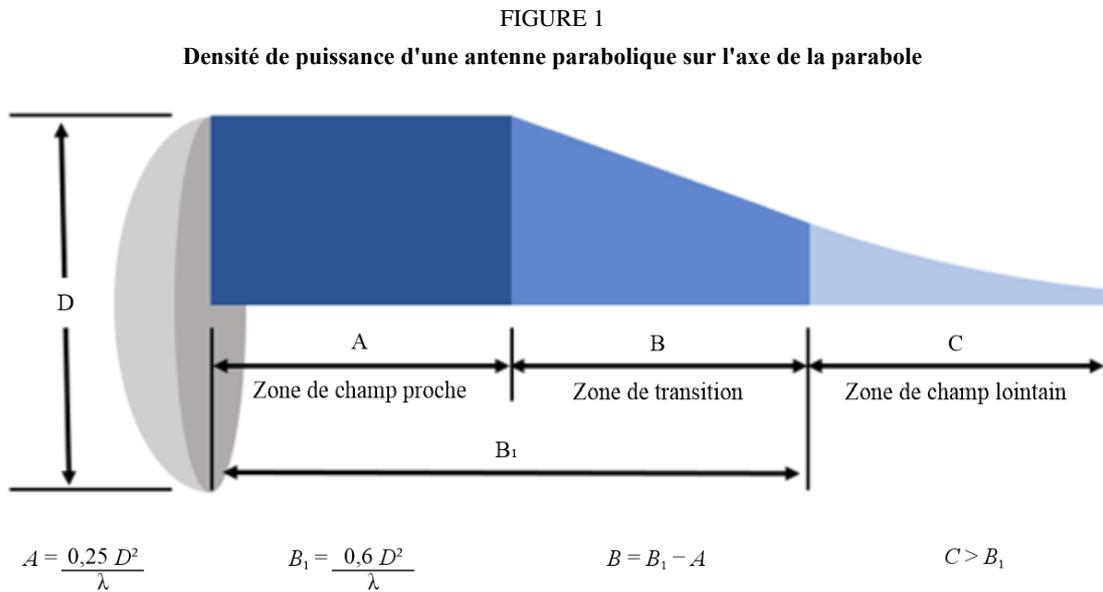
Pour les antennes paraboliques de diamètre $D \gg \lambda$, les définitions suivantes sont utilisées; voir également la norme ETSI TR 102 457 [7]:

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 diminuer avec la distance. La valeur maximale de la densité de puissance en champ proche sur l'axe dépend uniquement de la puissance fournie à l'antenne, du diamètre D de l'antenne et du rendement de l'antenne.

Région de transition: la densité de puissance dans la région de transition décroît inversement avec la distance par rapport à l'antenne.

Région de champ lointain: la densité de puissance dans l'espace libre en champ lointain, ou région de Fraunhofer, du diagramme d'antenne décroît inversement au carré de la distance.

Les diverses zones d'une antenne parabolique (utilisées principalement pour les évaluations point à point) sont représentées à la Fig. 1. L'approche ci-après n'est valable que le long de l'axe principal de l'antenne.



BT.1698-01

Dans la zone de champ proche, une antenne parabolique rayonne sur toute la longueur de la zone sous la forme d'un cylindre de diamètre D . Le champ EMF maximal et sa densité de puissance sont constants dans toute la zone de champ proche.

Ceci est exprimé par l'équation:

$$S(\text{W/m}^2) = \frac{16\eta P}{\pi D^2} \quad (11)$$

où:

- η : efficacité de l'antenne parabolique (utilisation de 0,55)
- P : puissance de l'émetteur (W)
- D : diamètre de l'antenne parabolique (m).

La densité S est maximale dans toute la zone de champ proche.

À partir du point 1 (début de la zone de transition), la densité S décroît linéairement avec la distance r jusqu'au point 2, où commence la zone de champ lointain.

Dans la zone de champ lointain en espace libre, S décroît en fonction du carré de la distance conformément à l'équation:

$$S(\text{W/m}^2) = \frac{GP}{4\pi r^2} \quad (12)$$

où:

G : gain de l'antenne parabolique par rapport 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.

2.3 Champ de fréquences mixtes

Il est courant d'avoir plus d'un émetteur (utilisant des fréquences différentes) situé sur le même site d'émission. Dans ce cas, il est nécessaire de considérer un effet total (combiné) de l'exposition des personnes à l'énergie RF. Par ailleurs, les effets dépendent de la fréquence et, par conséquent, après avoir calculé les paramètres pertinents (S , E et H), il convient de tenir compte de l'effet combiné.

Pour les effets thermiques, les limites d'exposition sont données en termes de taux d'absorption spécifique (SAR) (voir la Pièce jointe 3), ce qui signifie qu'il convient de déterminer les densités de puissance appropriées. Dans le cas d'un site d'émetteur multifréquence, il est recommandé que la densité de puissance totale soit la somme de la densité de puissance à chaque fréquence d'émission:

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i \quad (13)$$

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

$$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{L_i} \leq 1 \quad (14)$$

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 du principe de base, mais il y a quelques différences dans la façon dont ce principe est appliqué (voir la Pièce jointe 3).

2.4 EMF à l'intérieur des bâtiments

Les matériaux d'un bâtiment et l'infrastructure à l'intérieur d'un bâtiment ont une très forte influence sur le champ électromagnétique, provoquant des variations du champ résultant, d'un point à un autre, même dans la même pièce. Les variations spatiales du champ EMF sont dues aux réflexions multiples de l'onde incidente, de sorte que la polarisation du champ résultant peut différer de celle de l'onde incidente.

Les objets métalliques et les conduits (lignes et tubes) provoquent un rerayonnement (agissant comme une source secondaire) et modifient l'intensité des champs EMF dans leur voisinage.

Toutes ces conditions rendent difficile l'évaluation de l'exposition. Il convient de tenir compte d'un assez grand nombre de paramètres lors des calculs ou des mesures.

Pour obtenir une précision acceptable dans le calcul de l'exposition, il est nécessaire de choisir un modèle approprié pour représenter l'environnement.

La précision de la mesure dépend de la taille et du type 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. Voir le Rapport UIT-R SM.2452 – Mesures des champs électromagnétiques pour évaluer l'exposition des personnes, les Recommandations UIT-R P.1238, UIT-R P.2109 et UIT-T K.61.

La question cruciale n'est pas simplement la valeur des limites d'exposition elles-mêmes, mais aussi la manière dont les calculs et les mesures doivent être effectués, et c'est là le principal objectif de la présente Recommandation.

3 Calcul

Les procédures analytiques ne peuvent être utilisées que pour calculer les propriétés électromagnétiques pour quelques cas particuliers et géométries. Pour résoudre des problèmes généraux, il faut appliquer des techniques numériques. Les programmes commerciaux peuvent être utilisés selon les cas. L'optique physique et géométrique ne s'applique pas en champ proche; on trouvera dans la CEI 62232 [5] des informations et des lignes directrices complémentaires sur les méthodes de calcul de l'exposition aux champs électromagnétiques.

3.1 Procédures

Les méthodes de calcul analytique et numérique permettent de prévoir les champs externes ou internes d'un émetteur électromagnétique. Les calculs sont utiles pour estimer le niveau du champ dans une situation d'exposition donnée afin de déterminer si des mesures sont nécessaires et quel équipement il convient d'utiliser. Les calculs peuvent également compléter les mesures et être utilisés pour vérifier que les résultats des mesures sont raisonnables.

Dans certaines situations, par exemple dans des conditions complexes d'exposition en champ proche, lorsque l'on ne dispose pas d'équipements de mesure SAR onéreux, les calculs peuvent remplacer les mesures.

La précision et la qualité des calculs dépendront de la méthode analytique ou numérique utilisée et de la précision de la description de la ou des sources électromagnétiques et des objets physiques entre l'émetteur et le point de prévision qui peuvent influencer sur les champs. Pour les calculs du taux d'absorption spécifique, la précision du modèle corporel aura également une incidence sur la qualité des résultats.

Pour pouvoir effectuer un calcul, les paramètres source doivent être connus ou estimés.

Exemples de paramètres de source de radiodiffusion: fréquence, puissance, diagramme d'antenne, gain et altitude au-dessus du sol.

3.2 Solutions fermées

Dans la région de champ lointain d'une source d'émission, où les champs EMF sont principalement des ondes planes, des expressions analytiques peuvent être utilisées pour estimer les intensités de champ. Dans la direction principale d'une antenne, on peut utiliser l'équation de Friis en espace libre pour calculer la densité de puissance:

$$S = \frac{PG}{4\pi d^2} \quad (15)$$

où:

- S : densité de puissance (W/m^2)
- P : puissance moyenne de sortie (W)
- G : gain d'antenne en champ lointain par rapport à une antenne isotrope

d : distance par rapport à l'antenne (m).

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

$$S = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0 \quad (16)$$

où:

E : intensité du champ électrique (V/m) (valeur moyenne quadratique)

H : intensité du champ magnétique (A/m) (valeur moyenne quadratique)

Z_0 : impédance intrinsèque de l'espace libre, 120π (377) Ω .

Par conséquent, à l'aide des équations ci-dessus, on peut calculer les intensités de champ:

$$E = \sqrt{\frac{P G Z_0}{4\pi d^2}} = \frac{5,5\sqrt{PG}}{d}$$

$$H = \sqrt{\frac{PG}{4\pi d^2 Z_0}} = \frac{\sqrt{PG}}{68,8d}$$

Ces équations ne sont valables que dans la région de champ lointain de la source rayonnante, c'est-à-dire lorsque $d > 2D^2/\lambda$, où D est la plus grande dimension de la structure rayonnante et λ est la longueur d'onde. L'affaiblissement ou l'accroissement du champ dû à la réflexion, à la transmission des matériaux et à la diffraction n'est pas pris en compte. L'utilisation des équations ci-dessus dans la région de champ proche ou dans des directions autres que la direction principale donnera généralement une valeur trop élevée, à moins d'introduire un facteur de correction en champ proche ou un facteur de diagramme de rayonnement.

4 Mesures

4.1 Procédures

Les méthodes de mesure sont essentielles, en particulier pour les champs proches et basses fréquences; voir le Rapport UIT-R SM.2452 «Mesures des champs électromagnétiques pour évaluer l'exposition des personnes», les Recommandations UIT-T K.61, EN 50496 [8] et EN 50 554 [9]. Pour les bandes de fréquences inférieures, la méthode de mesure est une question très délicate et complexe, étant donné que la distance entre le point de mesure (depuis la source d'émission) est généralement bien inférieure à la longueur d'onde. C'est pourquoi, pour les mesures, la gamme de fréquences de 10 kHz à 300 GHz est divisée en quatre grandes bandes de radiodiffusion, à savoir les bandes LF/MF, HF, VHF/UHF et SHF/EHF. Conformément aux lignes directrices 2020 de l'ICNIRP visant à limiter l'exposition aux champs électromagnétiques (100 kHz à 300 GHz) [1], E et H ne sont utilisés que jusqu'à 2000 MHz; alors que la densité de puissance incidente n'est utilisée qu'au-dessus de 30 MHz.

4.1.1 Bandes d'ondes kilométriques/hectométriques

Afin de vérifier les résultats théoriques, les mesures du champ dans la zone proche utilisent des instruments spéciaux (mesureurs de champ) avec trois doublets courts placés sur le plan orthogonal. Il est recommandé de ne pas utiliser d'instrument nécessitant un câble d'alimentation.

Pour éviter toute influence perturbatrice de la personne effectuant la mesure, l'instrument de mesure doit être fixé à une tige isolante. La distance entre l'instrument et l'opérateur doit être déterminée en tenant compte de la question de savoir si des changements sur l'échelle de l'instrument sont dus à des mouvements quelconques de l'opérateur. Cette distance dépend de la fréquence du signal mesuré.

Pour effectuer ce type de mesure, il faut tenir compte des influences possibles de tous les objets situés à proximité et, en particulier, de ceux qui peuvent créer des effets de rerayonnement.

Lorsque l'objet d'une mesure est de vérifier les résultats obtenus à partir d'un calcul théorique, les points de mesure doivent 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 d'ondes décamétriques

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

4.1.3 Bandes d'ondes métriques/décimétriques

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

4.1.4 Bandes SHF/EHF

Compte tenu de la longueur d'onde et des distances par rapport aux sources d'émission, une méthode de mesure normalisée doit être appliquée.

4.2 Instruments

4.2.1 Introduction

La mesure des champs d'exposition dans la gamme de fréquences 10 kHz – 300 GHz nécessite un effort important pour déterminer la variabilité spatiale et temporelle du champ à déterminer.

Il est nécessaire d'utiliser des instruments adéquats et un dispositif de mesure valable. Il est important de connaître les caractéristiques des instruments de mesure car ces caractéristiques déterminent le choix approprié de l'instrument. Les caractéristiques dépendantes de la fréquence, telles que les interactions du câble, les réponses hors bande non étalonnées et les réponses en fréquence modelée, sont particulièrement importantes pour les instruments à large bande. D'autres propriétés du champ doivent être adaptées aux caractéristiques de l'instrument; par exemple, réactif ou rayonnant, polarisation et modulation, ou nombre de sources de champ.

L'exposition des personnes aux champs EMF est généralement mesurée en unités de densité de puissance, mais d'autres mesures telles que le courant induit dans le corps peuvent être plus pertinentes, et ce sont là quelques-uns des aspects critiques de la protection ou du 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 et, par conséquent, dans cette situation, chacun doit être mesuré.

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

- instruments de mesure de la valeur d'intensité des champs E et H ;
- instruments de mesure du courant.

4.2.1.1 Généralités

Les éléments de base de ces instruments sont les suivants:

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

4.2.1.2 Sondes

La sonde isotrope théorique présente un diagramme de rayonnement sphérique. La plupart des sondes sont isotropes ou omnidirectionnelles en trois dimensions pour mesurer l'énergie provenant de toutes les directions.

Les sondes doivent présenter les caractéristiques suivantes:

- répondre aux champs voulus, E ou H , sans répondre aux champs non voulus;
- en général, la sonde est électriquement petite et inférieure à $\lambda/10$ pour la fréquence maximale de fonctionnement; toutefois, des évaluations spéciales ont montré que certaines sondes peuvent avoir une grande dimension électrique;
- réagir de façon prévisible aux variations des conditions environnementales, comme la température et l'humidité.

Il est très important que, pendant la mesure, les sondes isotropes soient positionnées de telle sorte que la connexion puisse réduire la perturbation du champ au niveau de la sonde par les câbles de connexion. Cette perturbation du champ pose le plus souvent problème lors de la mesure du champ électrique en ondes moyennes ou à basse fréquence.

4.2.1.3 Câbles

Les câbles utilisés pour connecter la sonde et l'instrument de lecture et de calcul doivent être exempts de bruit et empêcher le couplage du champ avec l'unité de mesure.

Il est très important de noter qu'il est possible que les câbles agissent comme une antenne et modifient le champ au niveau de la sonde de manière à provoquer une lecture incorrecte. Il est parfois possible de résoudre ce problème en réglant, pendant l'essai, les câbles perpendiculaires au champ électrique; l'utilisation de ferrites de suppression sur le câble de mesure permet d'atténuer ces effets.

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

En général, la mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques est effectuée dans le domaine fréquentiel. Il existe deux principaux groupes d'instruments.

4.2.2.1 Types d'instruments à large bande et spécifications

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

FIGURE 2
Instruments large bande



BT.1698-02

Les instruments à large bande sont constitués de capteurs qui peuvent être non isotropes pour mesurer une composante spatiale unique du champ ou isotropes pour mesurer simultanément les trois composantes du champ. Ces instruments peuvent mesurer le niveau total du champ électrique ou magnétique instantané, ou la valeur moyenne quadratique du champ ou la valeur de densité de puissance moyenne sur une période de temps généralement de 6 minutes conformément aux normes d'exposition. Les instruments large bande peuvent être classés dans les catégories suivantes, selon le détecteur utilisé:

- diode;
- bolomètre;
- thermocouple.

Ces instruments peuvent être utilisés dans les deux situations, en champ proche et en champ lointain.

4.2.3 Types d'instruments à bande étroite et spécifications

Les instruments à bande étroite sont sélectifs en fréquence et peuvent mesurer l'intensité du champ EMF dans une gamme de fréquences différentes. Les récepteurs à bande étroite sont particulièrement utiles dans le cas de sources multiples, car il est possible d'évaluer la contribution de chaque source au champ total. À l'aide d'un détecteur ou d'une antenne non isotrope, il est possible d'évaluer la direction et la polarisation du champ. Des précautions doivent être prises car les champs peuvent changer rapidement dans l'espace par rapport aux dimensions de l'antenne, en particulier en présence d'objets réfléchissants tels que murs, sol, poteaux métalliques et structures. Il est important de noter qu'en changeant le point de mesure, le champ détecté peut être complètement différent. La mesure peut également être influencée par la position de l'antenne et les câbles de connexion.

Lorsque la mesure des champs électromagnétiques est effectuée dans le domaine temporel, il est nécessaire d'utiliser des instruments ayant des caractéristiques d'analyse appropriées (en fréquence et en résolution) pour obtenir de bons résultats dans l'analyse spectrale par transformée de Fourier.

Ce système se compose des éléments de base suivants:

- Une antenne étalonnée qui convertit le champ électrique d'une antenne doublet ou le champ magnétique d'une antenne-cadre en une onde sur la ligne de transmission.
- Une ligne de transmission de connexion ou câble coaxial étalonné.
- Un récepteur sélectif, généralement un analyseur de spectre ou un récepteur de mesure, qui mesure, à l'aide d'un circuit d'accord, l'intensité du signal reçu en fonction de la fréquence.

L'analyseur de spectre donne les valeurs de la tension ou de la puissance dans le domaine des fréquences.

Au cours de ces mesures, il est important de s'assurer que les instruments de mesure ne perturbent pas le champ mesuré.

4.3 Comparaison entre prévisions et mesures

La comparaison entre les prévisions et les mesures montre que les résultats des mesures concordent bien avec les résultats obtenus par calcul théorique. Pour plus de détails, voir la Pièce jointe 2.

5 Précautions à prendre dans les stations d'émission de radiodiffusion et à proximité de celles-ci

La présente section décrit les précautions à prendre autour des stations d'émission de radiodiffusion pour limiter les risques potentiels dus à l'exposition aux fréquences radio. Ces risques se répartissent en deux grandes catégories, la première étant le risque direct pour la santé humaine résultant de l'exposition à des niveaux élevés d'émissions RF, y compris les chocs, les brûlures et le dysfonctionnement possible des implants médicaux. La deuxième catégorie comprend les risques indirects lorsque les émissions RF pourraient provoquer des explosions, des incendies ou perturber le bon fonctionnement des machines, des grues, des véhicules, etc.

5.1 Précautions à prendre pour limiter les effets directs sur la santé des émissions RF de haut niveau

Deux groupes de personnes sont considérés en termes de précautions qui peuvent raisonnablement être prises. Le premier groupe comprend les employés des stations d'émission ou les visiteurs officiels réguliers de ces stations. Bien que ce groupe puisse être exposé à un risque plus fréquent, la mesure dans laquelle les mesures de réglementation peuvent être appliquées est beaucoup plus grande que pour le deuxième groupe, qui est des membres du grand public.

5.1.1 Mesures de précaution (professionnelles) des employés

5.1.1.1 Mesures physiques

Le cas échéant, il convient de prévoir une barrière de protection pour limiter l'accès à toute zone où les limites d'exposition sont dépassées ou où un contact avec des conducteurs RF exposés est possible. L'accès à ces zones ne doit être possible qu'avec une clé ou un outil. Un enclenchement mécanique ou électrique doit être prévu pour les enceintes où l'accès pour la maintenance est nécessaire.

D'autres mesures physiques telles que des voyants lumineux ou des panneaux d'avertissement devraient également être utilisées en plus, mais non à la place, des barrières de protection.

Les risques de choc ou de brûlures dus aux tensions RF induites dans les objets conducteurs, comme les clôtures et les structures porteuses, doivent être réduits au minimum par des dispositifs de mise à la terre ou de mise à la terre RF efficaces et convenablement entretenus. Une attention particulière doit être accordée à la mise à la terre de tous les fils ou câbles temporaires tels que les raccordements de tambour.

Lorsque de tels objets doivent être manipulés dans un champ RF, il convient de fournir une protection supplémentaire contre les chocs ou les brûlures en portant des gants robustes et en procédant à un étiquetage efficace.

5.1.1.2 Procédures d'exploitation

Les évaluations des risques d'exposition aux fréquences radio doivent être effectuées par du personnel dûment formé et expérimenté lors de la construction et également lorsque des modifications importantes sont apportées à une station d'émission. L'objectif initial doit comprendre l'identification des éléments suivants:

- les zones dans lesquelles les personnes peuvent être exposées à des niveaux de référence;
- les différents groupes de personnes, par exemple les employés, les utilisateurs de sites, le grand public, qui peuvent être exposés;
- les conséquences de défaillances, telles que les fuites dues aux brides RF, le mauvais alignement de l'antenne ou des erreurs d'exploitation.

Une première vérification des niveaux d'exposition aux RF peut être effectuée par calcul ou par modélisation mathématique, mais il convient également d'effectuer des mesures sur échantillon à des fins de vérification. Dans la plupart des cas, cependant, des mesures seront nécessaires pour déterminer avec plus de précision les niveaux d'exposition aux fréquences radio. Les grandeurs réelles à mesurer (champ E, champ H, densité de puissance, courant induit) doivent être déterminées en fonction des circonstances. Il s'agit notamment des fréquences des stations, de la région du champ (champ proche/lointain) mesuré et de la question de savoir s'il est proposé de vérifier la conformité avec les restrictions de base (SAR) ou seulement avec les niveaux de référence. Ces circonstances détermineront aussi dans une large mesure si les trois composantes individuelles du champ doivent être mesurées séparément ou s'il convient d'utiliser un instrument isotrope. Des études d'exposition aux fréquences radio devraient alors être effectuées par un personnel formé à l'utilisation de ces instruments, en suivant les procédures de mesure prescrites et en enregistrant les résultats dans un format spécifié.

Une personne compétente désignée devrait être responsable de l'identification et de la fourniture d'instruments de mesure appropriés au sein de toute organisation ou entreprise. Ces instruments de mesure doivent toujours être utilisés conformément aux instructions du fabricant et faire l'objet d'un contrôle fonctionnel et d'un étalonnage régulier (fonctionnement avec une source de contrôle). Des étiquettes indiquant les dates de péremption doivent être apposées sur les instruments à la suite de ces essais ou étalonnages. Il convient de tenir des registres d'étalonnage, y compris si des ajustements et/ou des réparations ont été nécessaires à chaque occasion. Ces informations doivent ensuite être utilisées pour déterminer l'intervalle entre les étalonnages.

Il convient de mettre en œuvre des méthodes de travail garantissant que les limites d'exposition aux fréquences radio ne sont pas dépassées. Les employés devraient recevoir une formation sur les procédures de sécurité RF appropriées. Les travaux de maintenance, dans les zones soumises à des restrictions d'accès en raison de niveaux élevés d'exposition aux fréquences radio, devraient être planifiés autour des interruptions programmées de la transmission ou des changements de diagramme d'émission lorsque cela est possible. Cependant, il devrait toujours y avoir un équilibre entre l'exposition aux émissions RF et d'autres risques, comme le travail de nuit sur des pylônes, même en cas d'éclairage par projection. Si nécessaire, les émetteurs doivent être commutés à puissance réduite ou éteints pour permettre un accès sûr pour les travaux de maintenance ou de réparation.

Les zones interdites sur les stations d'émission doivent être clairement définies et marquées, et des systèmes de «permis de travail» 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. Tous les fonctionnaires qui travaillent régulièrement dans des zones fortement exposées aux fréquences radio devraient recevoir une alarme personnelle ou un mesureur de risque RF.

Il faut enregistrer les niveaux d'exposition supérieurs à ceux spécifiés pour l'exposition aux fréquences radio. Les sociétés ou organisations responsables de l'exploitation des stations d'émission

devraient surveiller la santé du personnel qui travaille régulièrement dans des zones fortement exposées aux fréquences radio et participer aux enquêtes épidémiologiques, s'il y a lieu.

Les détails des politiques et procédures générales relatives à la sécurité en matière d'exposition aux fréquences radio devraient être inclus dans des consignes de sécurité écrites et communiqués à tout le personnel concerné. En outre, des instructions locales devraient être publiées pour chaque station d'émission afin d'assurer le respect de ces politiques et procédures.

La formation à la sécurité devrait également porter sur la nature et les effets de l'exposition aux fréquences radio, les aspects médicaux et les normes de sécurité.

Une attention particulière doit être portée aux travailleurs particulièrement sensibles aux champs électromagnétiques, tels que les femmes enceintes, les travailleurs porteurs de dispositifs médicaux passifs ou actifs. Pour les travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs (DMIA), des directives détaillées sont disponibles dans les lignes directrices régionales, telles que les Documents CENELEC de la série EN 50527 – Procédure pour l'évaluation de l'exposition aux champs électromagnétiques des travailleurs porteurs de dispositifs médicaux implantables actifs. Voir également la Pièce jointe 6 de l'Annexe 1.

5.1.2 Mesures de précaution à l'égard du grand public

5.1.2.1 Mesures physiques

Les mêmes considérations que celles décrites au § 5.1.1.1 pour les employés s'appliquent au public en général. Il convient d'accorder une attention particulière aux zones où les limites d'exposition aux fréquences radio pourraient être dépassées en cas de défaillance. Des barrières de protection doivent être mises en place sous la forme de clôtures d'enceinte, mises à la terre si nécessaire. Une signalétique d'avertissement de danger supplémentaire peut être nécessaire.

5.1.2.2 Procédures d'exploitation

Les évaluations des risques, effectuées conformément au § 5.1.1.2, doivent tenir compte de la possibilité que des personnes du public aient des implants médicaux. Une procédure de fourniture d'informations sur les risques pour la santé de ces visiteurs potentiels devrait être adoptée avec des procédures d'accès restreint appropriées. Des consignes de sécurité RF de base devraient être fournies aux visiteurs ordinaires du site.

Il faut tenir compte de la nécessité d'étudier l'exposition aux fréquences radio au-delà des limites du site, en particulier lorsque les tensions induites dans les structures métalliques extérieures (grues, ponts, bâtiments, etc.) peuvent causer des brûlures ou des chocs mineurs. Pour effectuer ces études, il faut tenir compte de la possibilité que le champ augmente avec la distance, généralement en raison de l'élévation du terrain. Si nécessaire, une procédure de suivi des demandes de planification ou d'autres propositions d'aménagement devrait être mise en œuvre.

5.2 Précautions à prendre pour limiter les risques d'exposition indirecte aux fréquences radio

Les effets indirects de l'exposition aux fréquences radio, tels que les risques d'inflammation de substances inflammables, peuvent se produire à des niveaux bien inférieurs aux niveaux de référence, en particulier en ondes hectométriques et décamétriques. En effet, des substances inflammables peuvent être stockées sur un site ayant des structures conductrices associées, telles qu'une tuyauterie, qui pourraient servir d'antenne de réception relativement efficace. Les risques réels sont toutefois rares, mais peuvent inclure les usines de transformation industrielle, les installations de stockage de carburant et les stations-service. Obtenir une évaluation détaillée est toutefois loin d'être simple. La procédure générale recommandée ci-dessous est donc basée sur l'élimination progressive. Les

précautions détaillées adoptées devront toutefois tenir compte des normes ou de la législation nationales du pays concerné.

Il convient de procéder à une première évaluation, sur la base d'estimations pratiques du cas le plus défavorable, de la séparation minimale nécessaire entre un type particulier d'émetteur et une structure conductrice pour éviter un tel danger. La première étape consiste à déterminer le champ minimal susceptible de présenter un risque d'inflammation pour les fréquences particulières de l'émetteur utilisées. Ceci est fonction du type de substance inflammable et du périmètre de la boucle formée par des structures métalliques, généralement des tuyauteries, et peut être déterminé plus facilement à partir de tableaux ou de graphiques. La zone sensible doit ensuite être déterminée à partir de cette valeur minimale du champ par calcul, par modélisation mathématique ou à partir de tableaux/graphiques.

Si la zone sensible, telle que déterminée ci-dessus, contient de tels sites sur lesquels des substances inflammables sont stockées, ou si certains sont en projet, une évaluation plus détaillée doit alors être faite. Il convient de se fonder sur les dimensions réelles des structures métalliques, sur la catégorie de gaz de la ou des substances inflammables stockées et sur l'intensité du champ mesuré. Cette évaluation détaillée doit être effectuée par calcul de la puissance extractible de la structure métallique

afin de déterminer si celle-ci dépasse l'énergie minimale d'inflammation de la substance inflammable. Si tel est le cas, il convient de mesurer la puissance extractible et de mettre en œuvre toute modification nécessaire de la structure et/ou d'autres garanties.

Dans une catégorie similaire aux risques d'inflammation, se trouve la **détonation possible de matières explosives**. Cela se produira très rarement, mais des directives régionales détaillées sont disponibles dans les lignes directrices régionales, telles que le Document CENELEC PD CLC/TR 50426:2004. (Guide sur l'évaluation de l'amorçage involontaire de dispositif à fils de pontage électro-explosifs par rayonnement de fréquence radio). Parmi les autres effets indirects à prendre en considération figurent les brouillages causés aux systèmes de sécurité des véhicules, machines, grues, etc., situés à proximité ou à l'intérieur des limites des stations d'émission.

Le cas échéant, des précautions semblables en principe à celles décrites au § 5.1.2 peuvent être nécessaires.

Pièce jointe 1 à l'Annexe 1

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

1 Exemple A – Courbes des champs électrique et magnétique

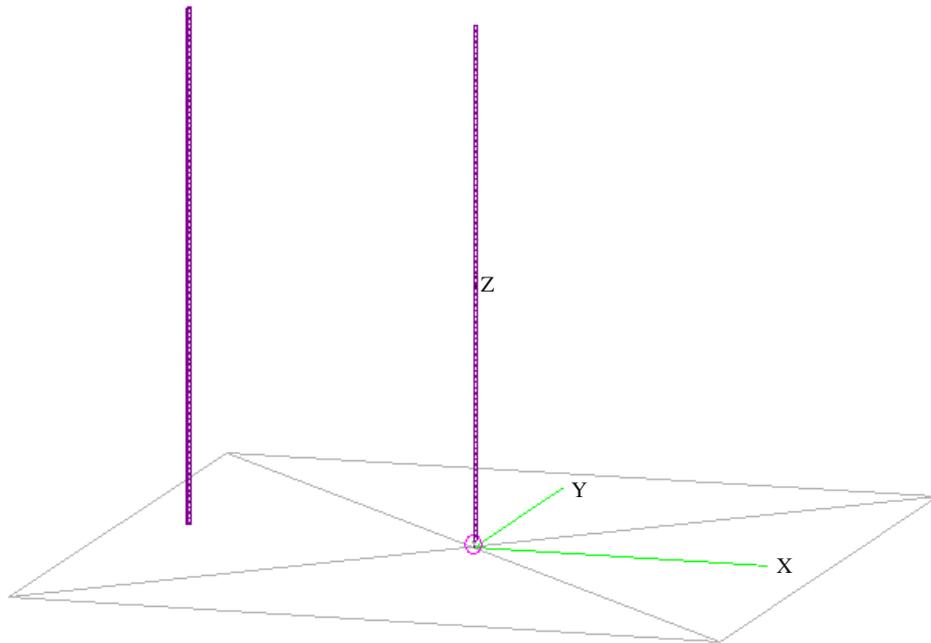
Conformément au § 3, il est possible de calculer numériquement la distribution des champs électriques et magnétiques à proximité d'antennes d'émission de radiodiffusion afin de déterminer l'intensité des champs en certains points ou dans certaines zones. Il s'agit notamment de la zone de champ proche où la structure du champ est généralement très complexe. Des calculs peuvent également être effectués afin de vérifier les contours du champ (lignes ou surfaces à champ constant) où les valeurs limites (niveaux) pertinentes des restrictions relatives aux champs électromagnétiques sont respectées. De cette façon, il est possible (par exemple à des fins de planification) d'évaluer l'étendue des zones concernées où des mesures de protection peuvent ou doivent être appliquées.

Dans les figures qui suivent, on trouvera sous forme de courbes quelques courbes de calcul d'antennes d'émission de radiodiffusion en ondes hectométriques et décamétriques.

La Figure 3 donne une simulation d'une antenne directive en ondes hectométriques; l'antenne est composée de deux mâts, chacun d'une longueur d'onde de demi-onde; l'un d'eux est alimenté, l'autre est un réflecteur passif. La Figure 3 illustre le modèle; les axes de référence ont une longueur de 50 m.

FIGURE 3

Simulation d'une antenne directive en ondes hectométriques

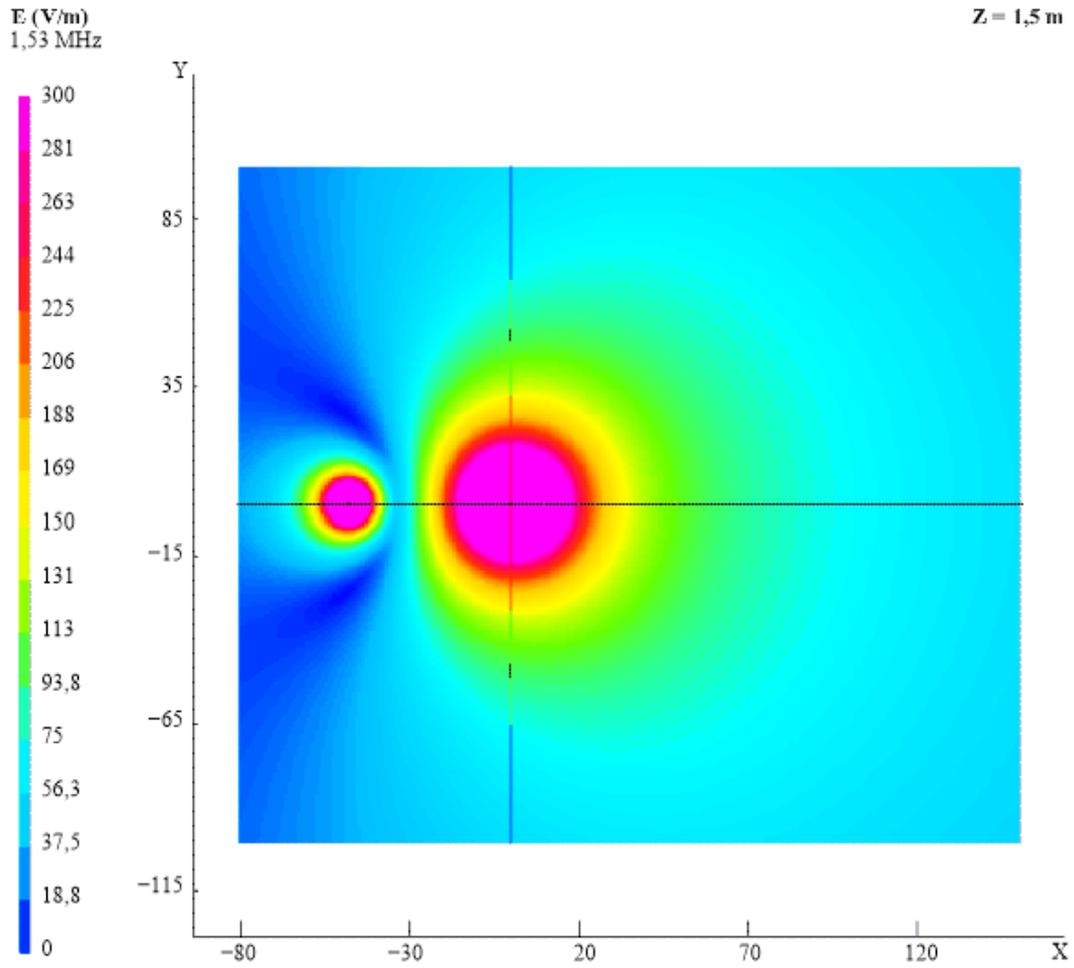


BT.1698-03

La Figure 4 montre l'intensité du champ électrique calculée à 1,5 m au-dessus du sol, avec une puissance d'entrée de 500 kW.

FIGURE 4

Intensité du champ électrique calculée à 1,5 m au-dessus du sol, avec une puissance d'entrée de 500 kW

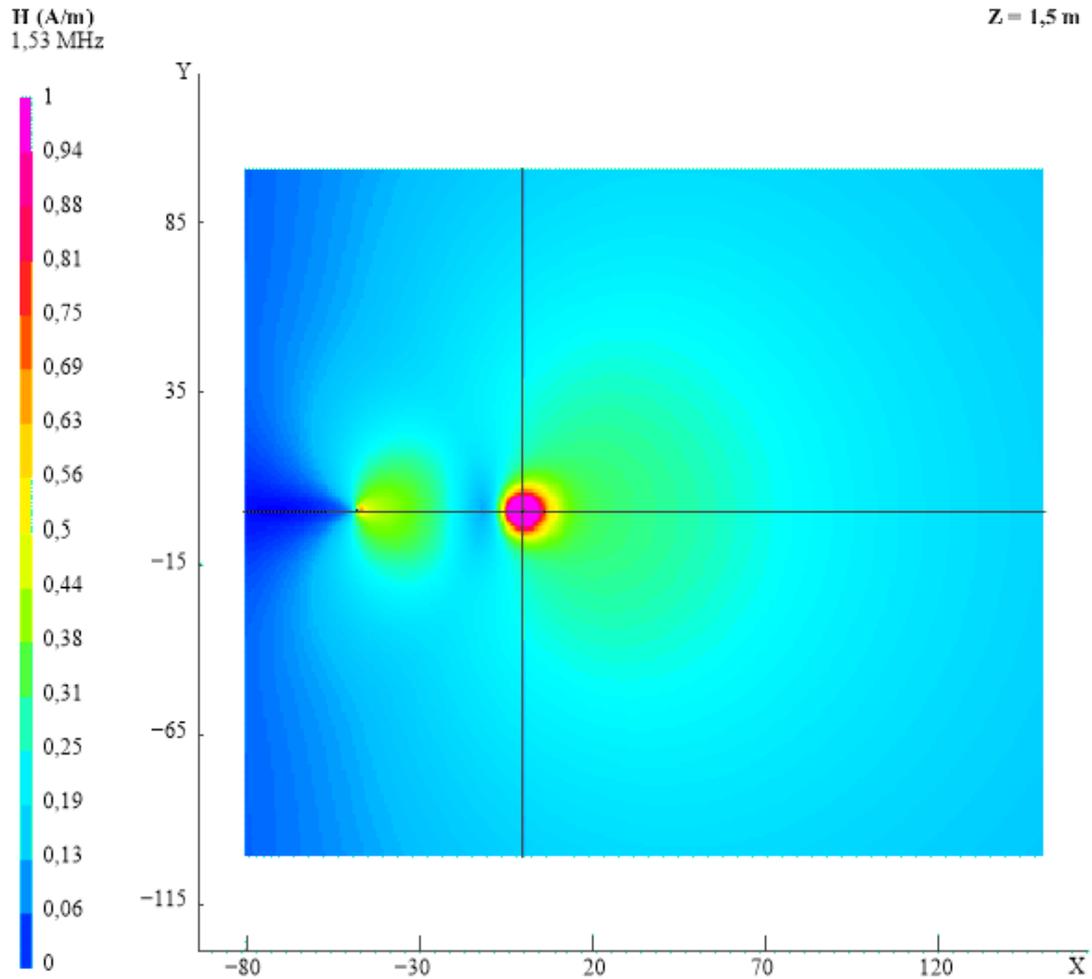


BT.1698-04

La Figure 5 montre l'intensité du champ magnétique calculée à 1,5 m au-dessus du sol, avec une puissance d'entrée de 500 kW.

FIGURE 5

Intensité du champ magnétique calculée à 1,5 m au-dessus du sol, avec une puissance d'entrée de 500 kW

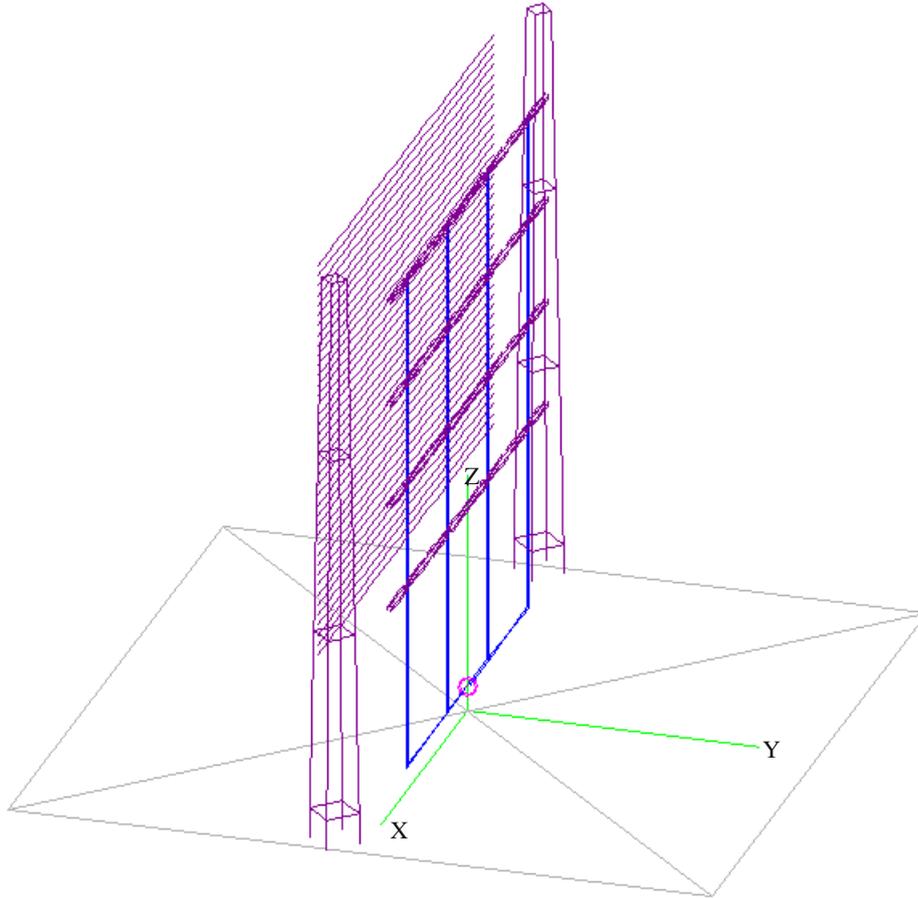


BT.1698-05

La Figure 6 représente le modèle d'une antenne-rideau type 4/4/1 en ondes décimétriques avec un réflecteur aperiodique à une longueur d'onde au-dessus du sol (AHR(S) 4/4/1). Il y a quatre rangées d'éléments, chacune comprenant quatre doublets. Les éléments rayonnants actifs de l'antenne, du réflecteur et d'une structure de support simplifiée sont pris en compte dans le modèle et les résultats montrant le champ électrique et le champ magnétique résultants sont représentés sur les Figures 7 et 8 respectivement à 1,5 m au-dessus du sol. Les axes (en vert) ont une longueur de 50 m comme référence.

Il convient de noter que les niveaux ne diminuent pas simplement de façon monotone lorsque la distance par rapport à l'antenne-réseau augmente.

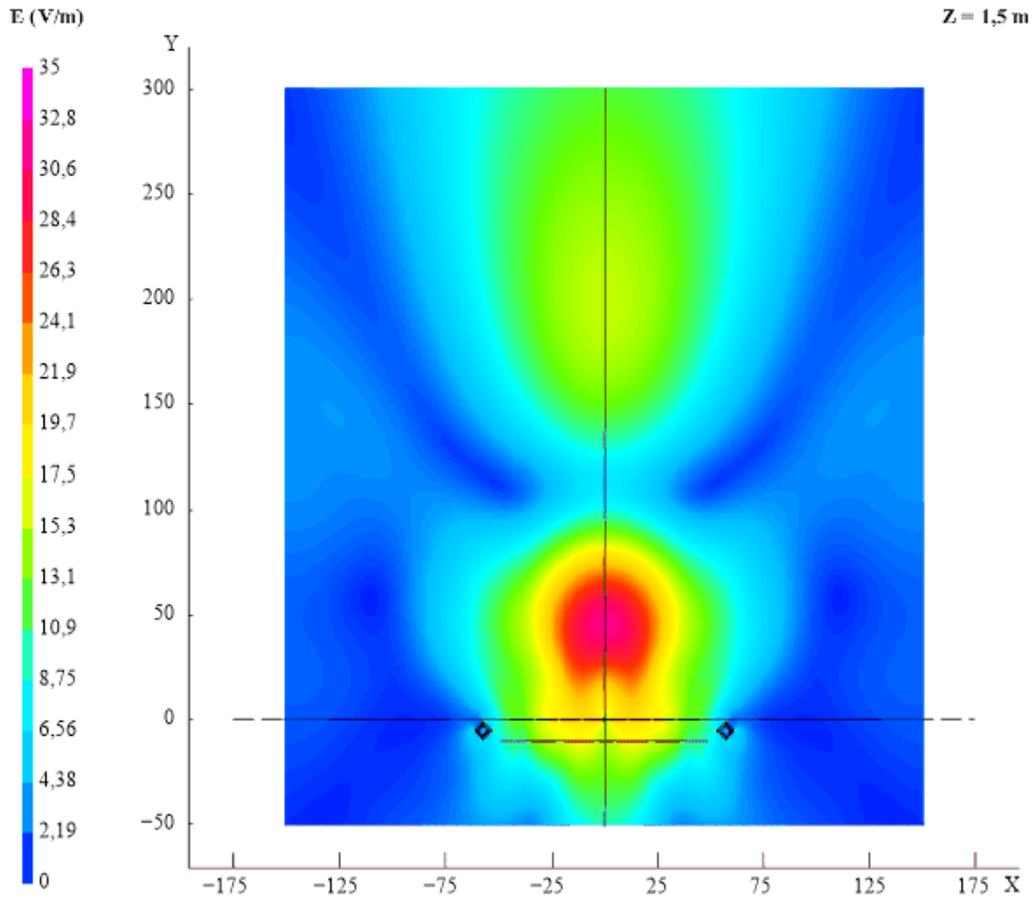
FIGURE 6
Modèle d'une antenne 4/4/1 typique de l'AHR(S)



BT.1698-06

FIGURE 7

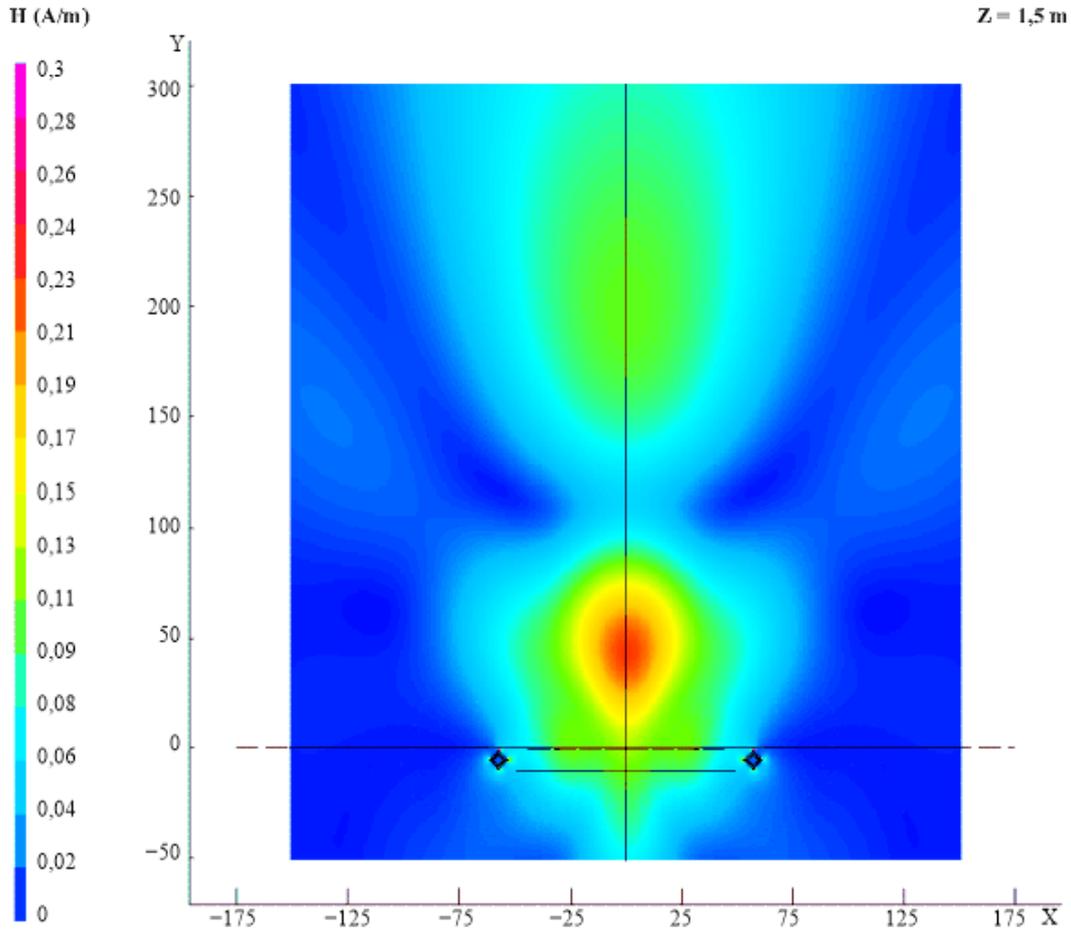
Champ électrique (V/m) calculé à 1,5 m au-dessus du sol; antenne rideau type ARS 4/4/1.
Puissance d'entrée 500 kW à 7 MHz



BT.1698-07

FIGURE 8

Champ magnétique (A/m) calculé à 1,5 m au-dessus du sol; antenne rideau type ARS 4/4/1.
Puissance d'entrée 500 kW à 7 MHz



BT.1698-08

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

Cet exemple détermine le champ magnétique dans la zone de champ proche d'antennes sur mât (antennes unipolaires) en ondes hectométriques et kilométriques, en résolvant l'équation intégrale de Hallen.

Dans les bandes de fréquences inférieures à 10 MHz, la relation physique entre E et H dans le champ EMF est beaucoup plus complexe. Cela contraste avec les fréquences plus élevées, où le champ électromagnétique présente les caractéristiques du champ dans la zone lointaine, même à de très courtes distances de la source d'émission, et où le concept de densité de puissance rayonnée (intensité du vecteur de Poynting) est très utile. En effet, dans la zone de champ proche, quelle que soit la fréquence, la relation simple entre les champs électrique et magnétique n'existe plus: les deux champs ne sont pas en phase et leur rapport n'est pas 377Ω . Mais, pour des fréquences aussi basses que 10 MHz et au-dessous, la zone de champ proche est plus grande que pour les fréquences supérieures.

Il est évident que les champs mesurés dépendront 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 de la composante E émise à forte puissance, les champs sur un site type en ondes kilométriques/hectométriques peuvent varier de quelques V/m à plus de 250 V/m. À proximité immédiate de l'antenne d'émission, le champ peut être de l'ordre de 1 000 V/m.

3 Exemple C – Champ électromagnétique proche des antennes-rideaux d'émission en ondes décamétriques

3.1 Introduction

Cet exemple traite de structures d'antenne plus complexes, appelées antennes-rideaux. Ces antennes sont très importantes pour les émetteurs de forte puissance en ondes courtes (HF). Ce sont en fait des réseaux de doublets horizontaux disposés dans un plan vertical.

La tendance générale à l'augmentation de la puissance et du gain des antennes d'émission est très prononcée en radiodiffusion à ondes décamétriques. Des puissances d'émission allant jusqu'à 500 kW et un gain d'antenne (dans la direction du maximum d'émission) supérieur à 20 dB (par rapport à un doublet demi-onde) ne sont pas rares dans les grands centres d'émission pour une couverture mondiale. Un émetteur de 500 kW modulé à 100% (voir la Pièce jointe 4 à l'Annexe 1) avec une antenne de gain de 20 dB produit une puissance apparente rayonnée (ERP) de 75 MW (dans la direction de l'émission maximale).

La Pièce jointe 5 (§ 2.1) décrit brièvement la technique numérique qui peut être utilisée pour calculer le champ électrique et le champ magnétique proches d'antennes de forte puissance.

Le § 3.2 donne les résultats pour les champs au voisinage d'antennes-rideaux en ondes décamétriques.

3.2 Champ électrique et champ magnétique proches des antennes-rideaux

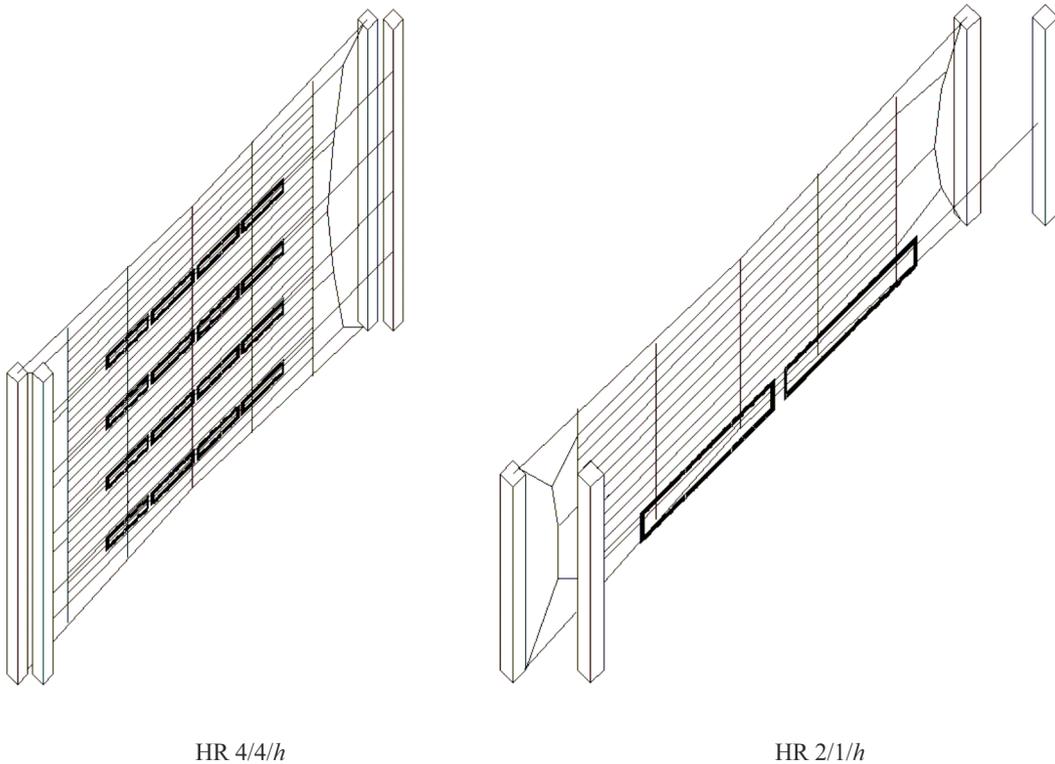
Il existe diverses antennes d'émission de forte puissance utilisées en radiodiffusion en ondes courtes, telles que les doublets horizontaux (formant généralement un réseau directif ou un rideau), les antennes en losange et les antennes unipolaires verticales. Les doublets d'une antenne-rideau sont généralement des doublets demi-onde, simples ou repliés, alimentés par des courants d'amplitude à peu près égale (mais parfois de phases différentes) pour produire le diagramme d'émission désiré. L'antenne a généralement un réflecteur passif qui, dans la plupart des cas pratiques, consiste en un treillis métallique (réflecteur aperiodique), mais peut aussi être un réseau de doublets accordés. Les antennes-rideaux sont caractérisées $H(R)(S) m/n/h$, où H désigne un réseau de doublets horizontaux disposés dans un plan vertical; R désigne un réflecteur (s'il y en a); S désigne un déphasage (s'il y en a) entre les courants alimentant des doublets adjacents colinéaires afin de dévier l'azimut du faisceau principal; m indique le nombre de doublets colinéaires dans chaque rangée; n désigne le nombre de doublets parallèles empilés verticalement (généralement à une distance d'une demi-longueur d'onde), c'est-à-dire le nombre de rangées (baies); et h désigne la hauteur de la rangée inférieure au-dessus du sol (en longueurs d'onde). Pour de plus amples informations, voir la Recommandation UIT-R BS.705.

Les réseaux en rideau ont d'excellentes propriétés, notamment un gain élevé (plus de 20 dB), c'est-à-dire un diagramme d'émission très directif et des capacités de traitement de puissance élevées (jusqu'à 500 kW). Ils jouent donc un rôle très important dans les grandes stations d'émission en ondes décamétriques. Le problème central de la présente Recommandation est de mettre au point une technique précise et efficace pour l'évaluation de ces champs.

Un champ d'antenne type d'une station de radiodiffusion en ondes décimétriques comporte plusieurs antennes à polarisation horizontale. Dans certains cas, il existe également des antennes quadrants, à caractéristiques omnidirectionnelles. Une antenne-rideau type contient 16 doublets repliés chacun, disposés en quatre baies de quatre éléments (HRS 4/4/h). Les antennes-rideaux ont parfois un réflecteur apériodique constitué de fils horizontaux fins ou d'un réseau de doublets accordés (voir la Fig. 9).

FIGURE 9

Réseaux rideaux en ondes décimétriques



HR 4/4/h

HR 2/1/h

BT.1698-09

Dans la littérature, peu d'ouvrages traitent du calcul des champs électrique et magnétique des antennes-rideaux en ondes décimétriques, mais tous sont fondés sur l'approximation sinusoïdale de la distribution du courant le long des doublets et sur l'hypothèse que les doublets d'alimentation en courant ont des amplitudes identiques. L'objectif 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, c'est-à-dire en alimentant les éléments par des tensions d'amplitude égale.

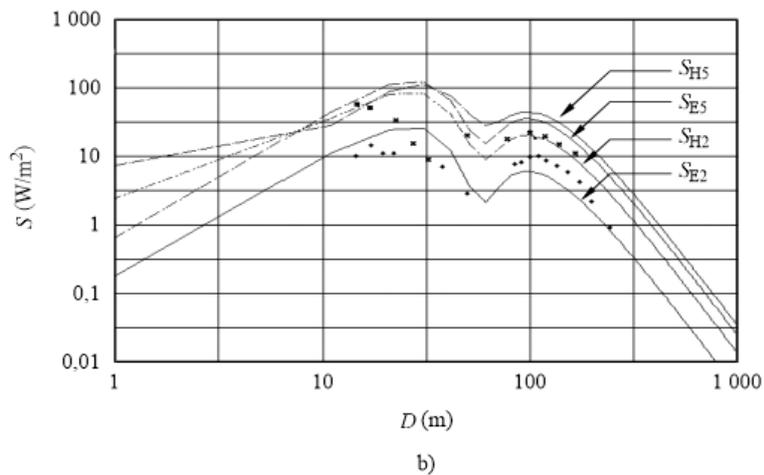
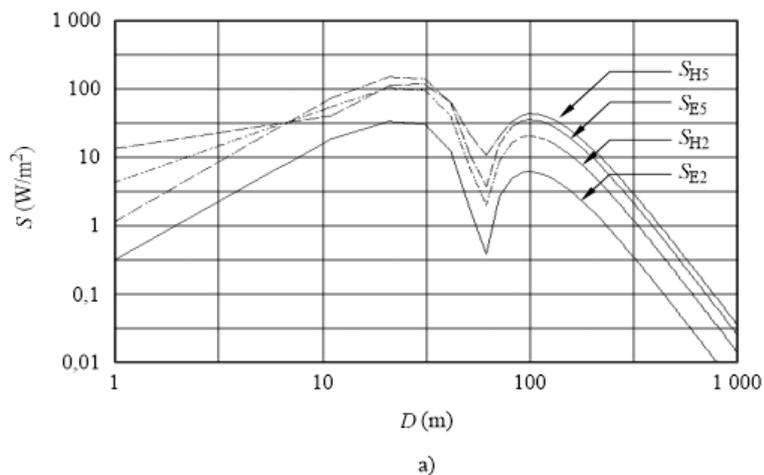
Il a été démontré de manière expérimentale (et confirmé de manière théorique en utilisant l'approximation sinusoïdale pour la distribution du courant) que l'approximation du sol réel par un plan parfaitement conducteur donne des résultats précis. Cette simplification est importante car elle ne peut traiter les antennes qu'au-dessus d'un sol parfait. La présente analyse a également été accélérée en remplaçant des doublets simples par des doublets repliés. Cette approximation a été établie pour obtenir des résultats précis. On considère que la longueur d'un doublet simple est légèrement inférieure à la moitié de la longueur d'onde à la fréquence nominale, d'après les données tirées des dimensions des antennes réelles. La distance entre les points d'alimentation des antennes adjacentes est toujours une demi-longueur d'onde, horizontalement et verticalement. La distance entre les doublets et le réflecteur est exactement un quart de longueur d'onde. Le réflecteur a été modélisé 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.

Les champs électrique et magnétique proches ont été évalués dans la direction du maximum du diagramme d'émission (car le champ dans la direction des lobes latéraux s'est avéré nettement plus faible). Les champs ont été évalués à des altitudes de $z = 2$ m, pour évaluer les risques d'exposition pour le personnel de la station de radiodiffusion, qui peut marcher dans le champ de l'antenne, et $z = 5$ m pour la population générale, en tenant compte des personnes vivant dans des habitations de deux étages.

FIGURE 10

Vecteur de Poynting «équivalent» de l'antenne HRS 4/4/1 lorsque les doublets sont alimentés par a) des courants et b) des tensions identiques, avec les données expérimentales (points)



Les résultats ont d'abord été comparés avec ceux d'une antenne HRS 4/4/1. La fréquence de fonctionnement de l'antenne était de 15,245 MHz et la puissance de l'alimentation était de 500 kW. La Figure 10 a) montre les résultats obtenus pour le vecteur de Poynting «équivalent», lorsque l'on suppose que les doublets sont alimentés par des courants identiques. La Figure 10 b) montre les mêmes résultats, mais en prenant les doublets alimentés par des tensions identiques, ainsi que les données mesurées à $z = 2$ m. La concordance entre les données théoriques et expérimentales est équitable. Il est évident que l'alimentation de l'antenne avec des tensions égales permet de mieux prévoir le champ réel, en particulier près de l'inclinaison, à 70 m de distance de l'antenne.

4 Conclusions

On a théoriquement étudié les champs électriques et magnétiques proches des antennes-rideaux à haute puissance d'émission. Des zones de sécurité pour les personnes à proximité de ces antennes ont été déterminées. Les résultats pour les champs proches des antennes-rideaux sont présentés selon une théorie rigoureuse et se révèlent être en bonne concordance avec les données expérimentales publiées ailleurs.

Pièce jointe 2 à l'Annexe 1

Comparaison entre prévisions et mesures

1 Avant-propos

Les simulations et les mesures ont été effectuées indépendamment par différents membres du personnel afin d'éviter toute influence réciproque sur les travaux et les résultats.

Le système d'antenne n'a été que partiellement simulé car 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 sur les Figs 11 et 12, pouvant fonctionner dans la bande des ondes courtes. Des comparaisons ont été faites à 13 MHz et à 18 MHz.

FIGURE 11
Exemple d'un réseau en ondes décamétriques

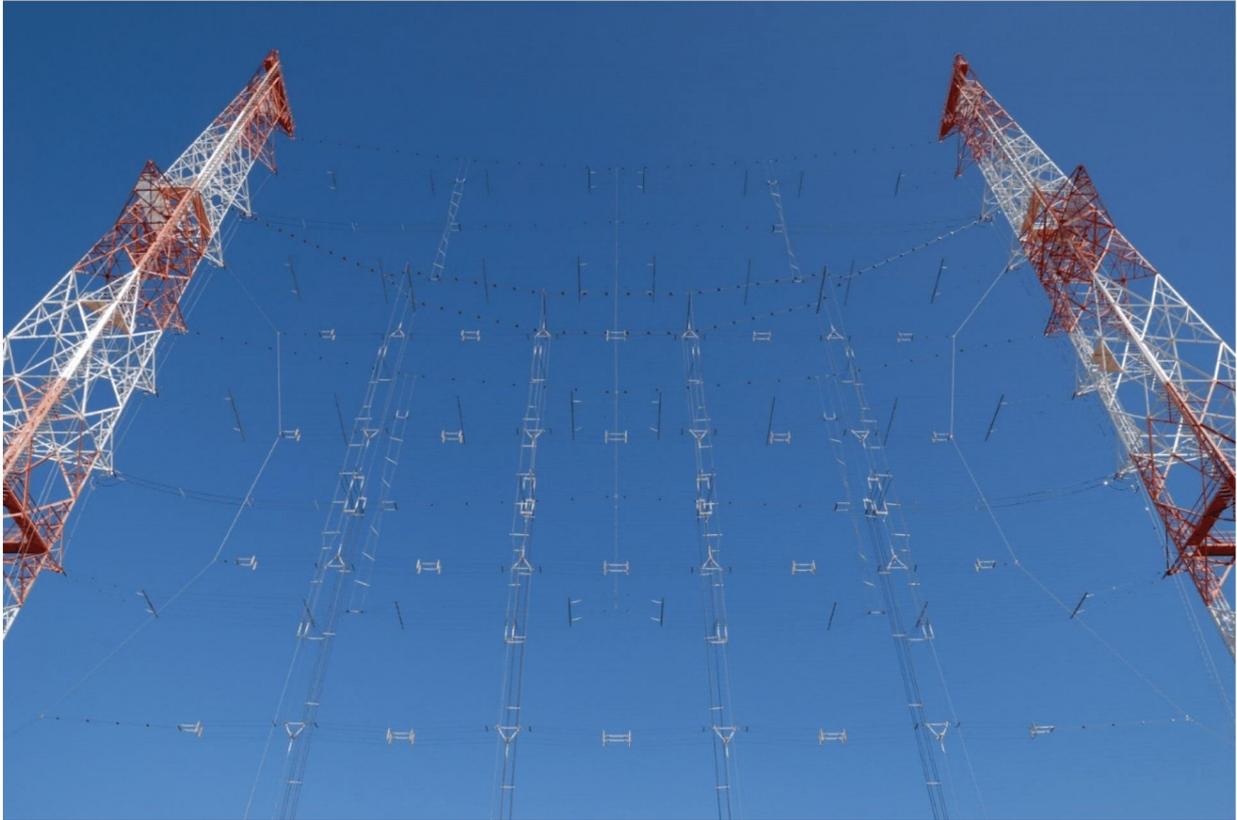


BT.1698-11

1.1 Modèle utilisé pour le système d'antenne

Le système d'antenne représenté sur la Fig. 11 est constitué d'un réseau à polarisation horizontale de 16 doublets repliés placés devant un réflecteur réalisé par un réseau filaire. Les doublets sont alimentés par des lignes bifilaires formant un réseau complexe d'adaptation d'impédance; toutes les lignes bifilaires du réseau d'adaptation d'impédance, représentées à la Fig. 12, sont principalement verticales (orthogonalement à des doublets); certaines lignes horizontales sont relativement courtes et orthogonales, à la fois aux doublets et aux lignes d'alimentation, dans le sens de la propagation. À la base de l'antenne se trouvent d'autres lignes bifilaires qui servent à répartir la puissance RF entre les quatre «colonnes» doublets.

FIGURE 12

Détail des éléments de rayonnement et partie du réseau d'adaptation

BT.1698-12

Afin de simplifier le modèle et d'éviter des détails inutiles et, par conséquent, un temps de calcul plus long, l'ensemble du système a été modélisé sous la forme d'un simple réseau de 16 doublets (voir la Fig. 13), alimentés chacun par son propre générateur de tension correctement mis en phase avec tous les autres, sans qu'il soit nécessaire de modéliser le réseau d'adaptation/d'alimentation. En outre, chaque doublet replié, constitué de deux fils parallèles repliés aux extrémités, a été modélisé comme un doublet replié à un seul fil, de section adéquate pour obtenir la même valeur d'impédance.

Enfin, chaque doublet a été représenté par 24 segments, chacun d'une longueur maximale de $\lambda/20$, comme indiqué à la Fig. 14.

1.2 Avantages et limites du modèle de système d'antenne

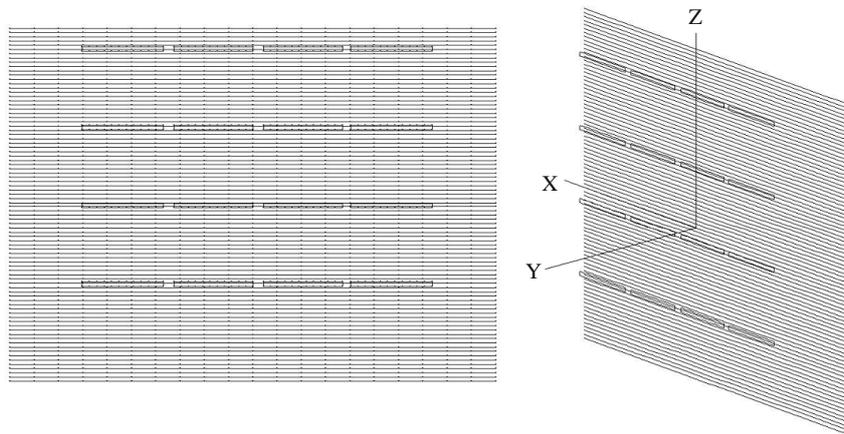
L'avantage le plus important est l'extrême simplicité du modèle réalisé par rapport à la complexité du système d'antenne réel. Avec ce modèle, il est possible d'obtenir un temps de calcul relativement court.

Un autre avantage est la possibilité d'ajuster facilement le modèle, si nécessaire, afin de mieux représenter le système réel. En fait, en général, le résultat d'une première comparaison entre les simulations et les mesures représente une bonne rétroaction pour effectuer quelques ajustements sur le premier modèle. La limitation la plus importante dans le modèle simple adopté est l'impossibilité de prendre correctement en compte la contribution du réseau d'adaptation/d'alimentation complexe aux composantes x , y , 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 n'apparaît pas (composante z), de même que la composante horizontale dans le

sens de propagation (composante y), sauf dans certains cas où les valeurs sont assez faibles; un comportement analogue est visible pour la composante x du champ H . En effet, la prévision a été faite sans tenir compte des éléments rayonnants verticaux et des éléments rayonnants dans la direction de propagation. Dans les résultats des mesures, au contraire, la composante verticale (z) et la composante horizontale (y) du champ E sont présentes, ainsi que la composante horizontale (x) du champ H , ce qui pose quelques problèmes de comparaison directe. La solution la plus raisonnable consiste à considérer ces deux composantes comme étant dues à la puissance qui n'atteint pas les réseaux de doublets; leur contribution au champ mesuré doit être prise en compte à l'intérieur de la composante horizontale (x) du résultat de la simulation. En d'autres termes, la contribution horizontale (x) résultant de la simulation doit être comparée au résultat global des mesures, obtenu comme racine carrée de la somme des contributions au carré mesurées sur les axes x , y , z .

FIGURE 13

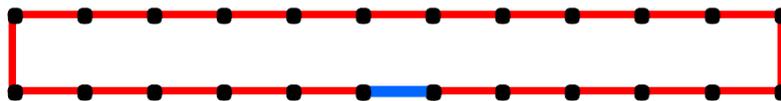
Modèle de réseau de doublets et son orientation dans le système à trois axes X, Y, Z
Chaque doublet est alimenté par son propre générateur de tension, en phase avec tous les autres.
Les contributions des champs E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , H_z de E et H au point d'évaluation ont la même orientation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



BT.1698-13

FIGURE 14

Modèle à doublet unique. Le doublet est modélisé par 24 segments de longueur égale à $\lambda/20$.
L'excitation est appliquée au centre du bras supérieur ou inférieur, au milieu du segment central



BT.1698-14

2 Comparaison entre prévisions et mesures

2.1 Analyse numérique des structures filaires – Exemple

2.1.1 Prédictions

2.1.1.1 Remarques sur le modèle

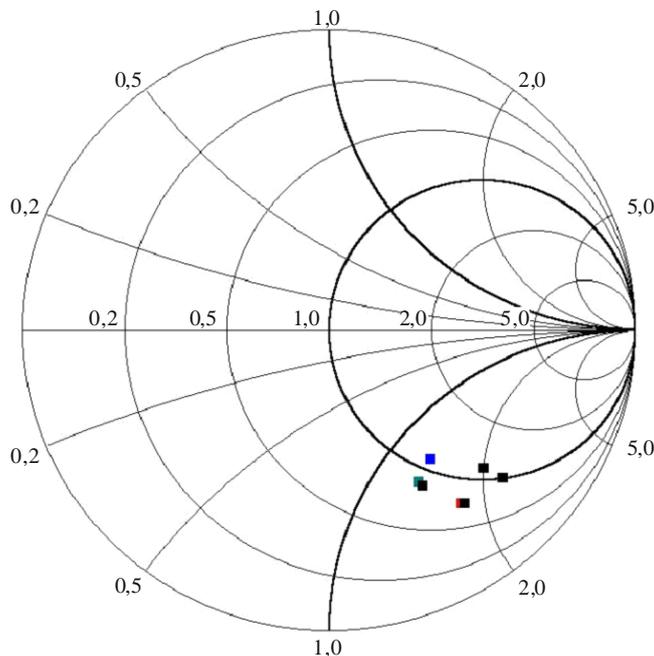
Afin d'adapter au mieux le modèle décrit précédemment au système d'antenne réel, il est nécessaire de connaître la quantité correcte de puissance à l'entrée de chaque doublet, en tenant compte des pertes dans la ligne de transmission.

Afin d'appliquer la valeur de tension appropriée à chaque doublet, on a calculé l'impédance d'entrée de chaque doublet. Les valeurs sont représentées à la Fig. 15.

FIGURE 15

Impédance d'entrée des doublets obtenue par simulation, normalisée à 600 Ω .
On notera la dispersion faible – mais non inexistante –
des valeurs de résistance près de 600 Ω

Impédance des doublets à 13 MHz (normalisée à 600 Ω)



BT.1698-15

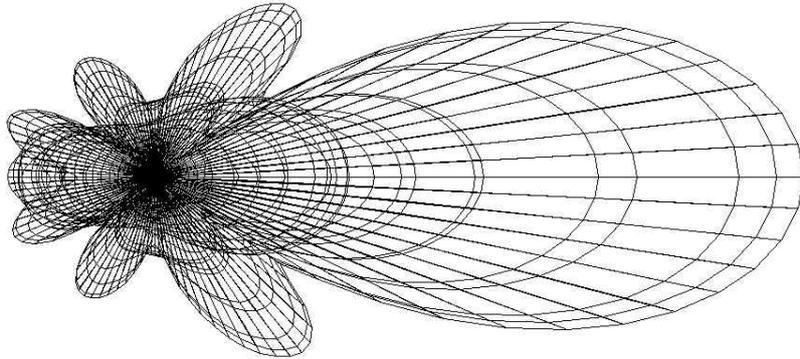
Ensuite, pour chaque doublet, une valeur commune de la résistance égale à 600 Ω a été adoptée, valeur moyenne obtenue par la simulation. Noter que cette décision peut être à l'origine d'inexactitudes dans les résultats de la prédiction.

Afin de compenser le défaut d'adaptation, dû principalement à la composante réactive et à la répercussion de la puissance en direction de l'émetteur, on a envisagé un accroissement de puissance approprié. En conséquence, une tension adéquate a été appliquée à chaque doublet.

2.1.1.2 Évaluations du champ lointain

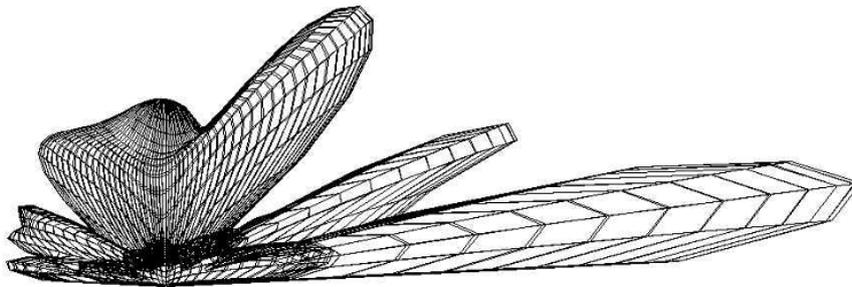
Afin de mieux comparer le comportement du modèle avec des antennes réelles (voir les Figs 11 et 12), on a calculé les diagrammes de rayonnement. Les résultats sont présentés à la Fig. 16 (plan horizontal), à la Fig. 17 (plan vertical) et à la Fig. 18 (vue frontale).

FIGURE 16

Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal

BT.1698-16

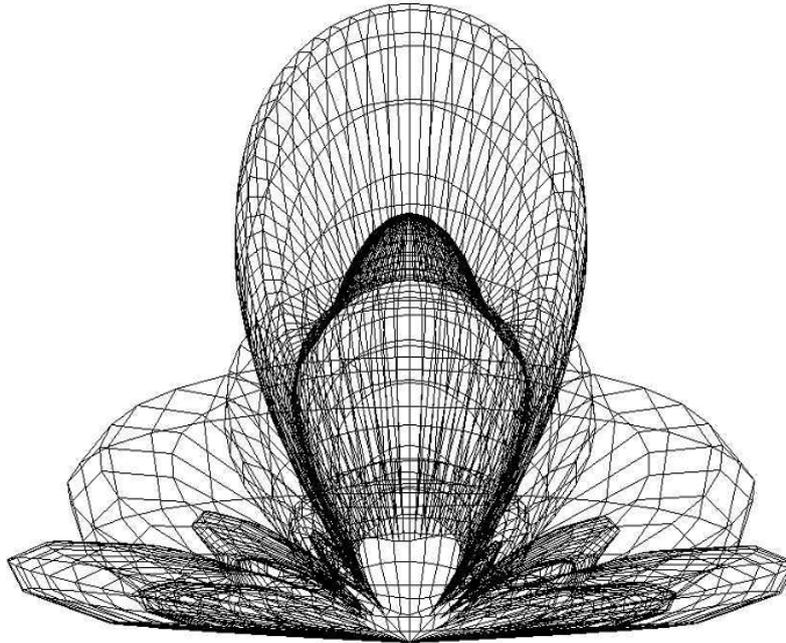
FIGURE 17

Diagramme de rayonnement dans le plan vertical

BT.1698-17

FIGURE 18

Diagramme de rayonnement, vue de face

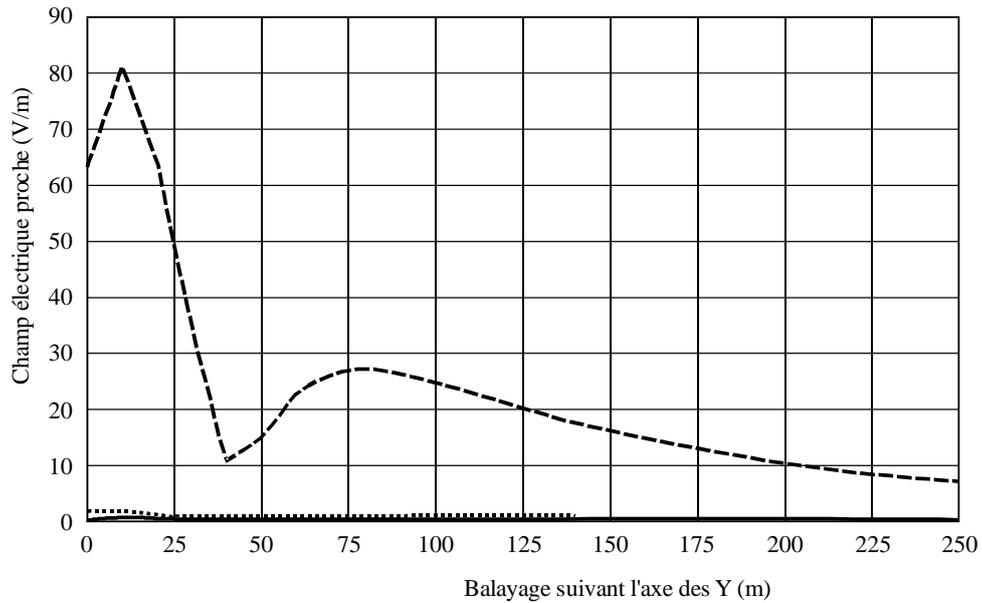


BT.1698-18

2.1.1.3 Résultats de la prévision du champ dans la zone proche

Une prévision a été faite en calculant les composantes x , y , z des champs E et H dans la direction du gain maximal de l'antenne (axe des Y) à 2 m au-dessus du sol (axe $Z = 2$). Les valeurs calculées sont représentées à la Fig. 19 (champ E) et à la Fig. 20 (champ H). La forte influence du terrain tant dans les évaluations que dans les mesures peut introduire une différence supplémentaire entre les deux résultats. Pour montrer la forte influence du terrain, on a également calculé les valeurs des champs E et H en faisant varier la hauteur du point d'évaluation au-dessus du sol (axe Z) de 0 à 9 m à une distance fixe de 60 m ($Y = 60$). Le comportement est illustré à la Fig. 21 (champ E) et à la Fig. 22 (champ H).

FIGURE 19
Champ E calculé dans la zone proche



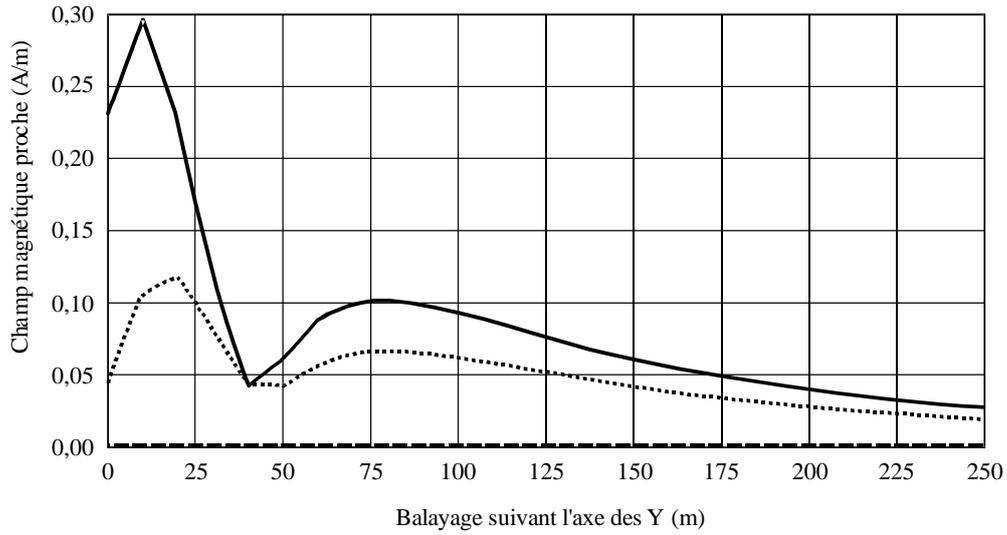
13 MHz, champ électrique proche en fonction de la distance; puissance de l'émetteur: 225 kW au niveau du connecteur d'antenne. Hauteur: 2 m par rapport au sol.

- 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

BT.1698-19

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

FIGURE 20
 Champ H calculé dans la zone 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

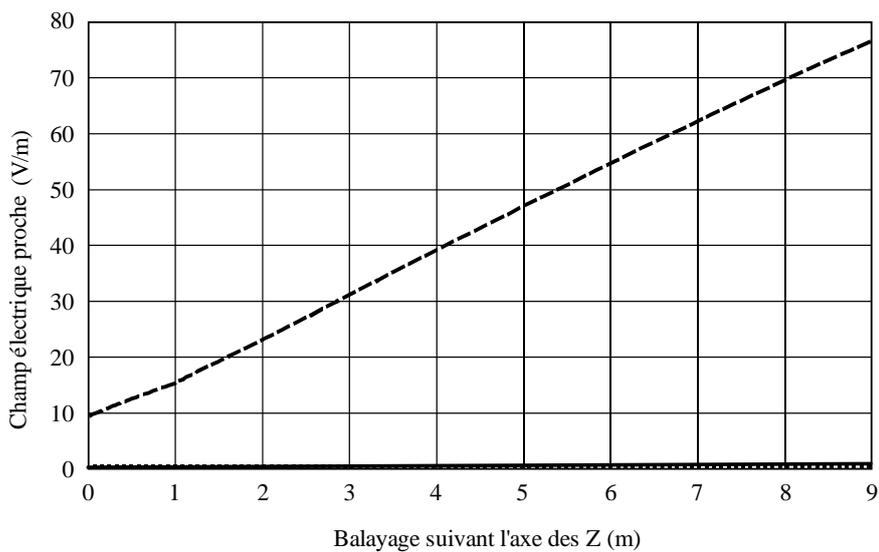
- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT13

BT.1698-20

La principale contribution est la composante y. La composante z est inférieure, tandis que la composante x est égale à 0. L'axe horizontal représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage en 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 21

Champ calculé E à une distance de 60 m de l'antenne (Y = 60) à différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage Z)



13 MHz, champ magnétique 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

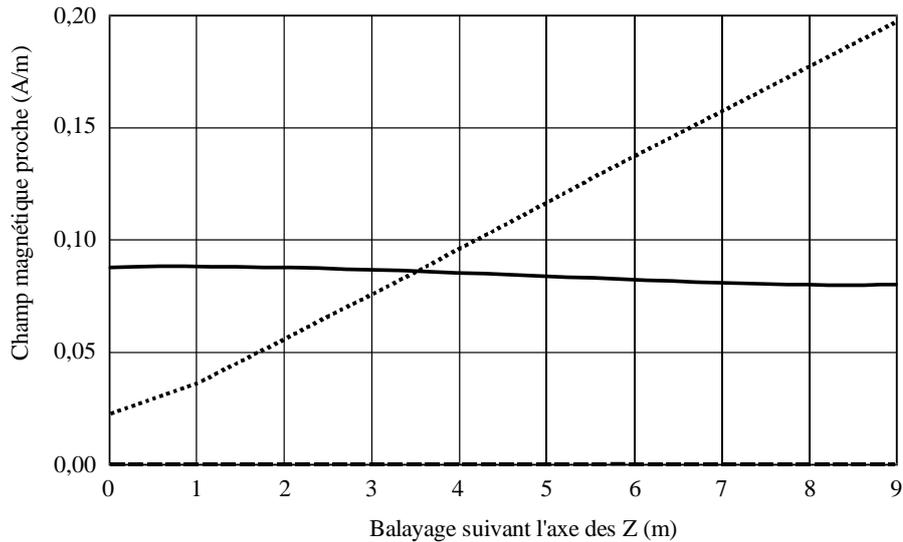
- Champ magnétique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13
- Champ magnétique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT13

BT.1698-21

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

FIGURE 22

Champ calculé H à une distance de 60 m de l'antenne (Y = 60) à différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage 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

BT.1698-22

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 relativement constante) est également évidente.

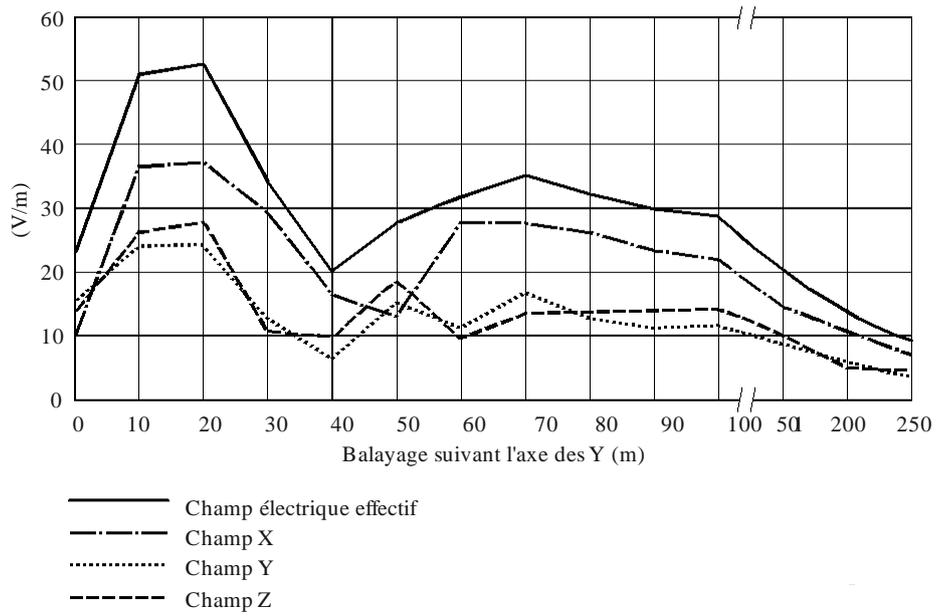
2.1.2 Mesures

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un mesureur de champ à large bande installé sur un chariot diélectrique déplacé par un opérateur placé loin du site de l'antenne. On évite ainsi toute perturbation des champs E/H.

2.1.2.1 Résultats des mesures

Les valeurs mesurées sont présentées à la Fig. 23 (champ E) et à la Fig. 24 (champ H). Les Figures 23 et 24 sont directement comparables aux Figs 19 et 20 respectivement.

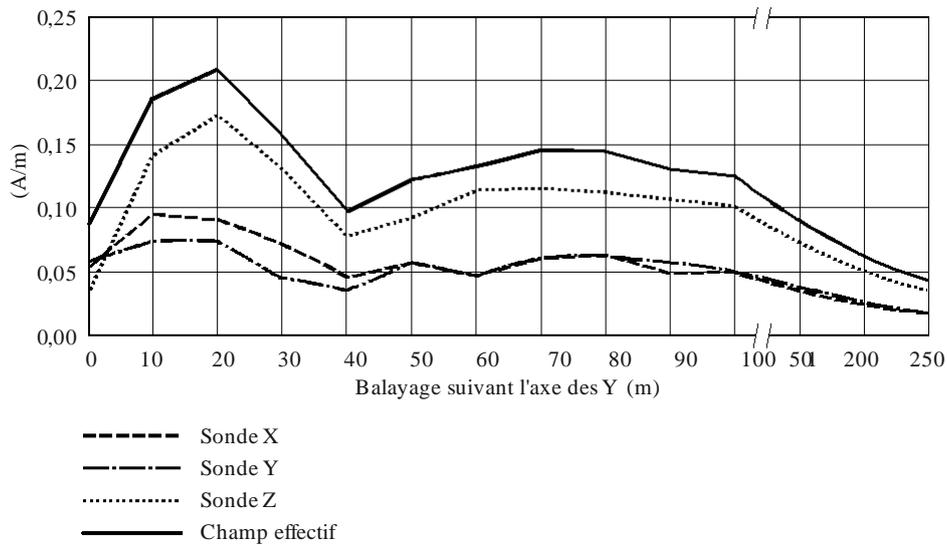
FIGURE 23
Champ E mesuré



BT.1698-23

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

FIGURE 24
Champ H mesuré



BT.1698-24

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

2.2 18 MHz

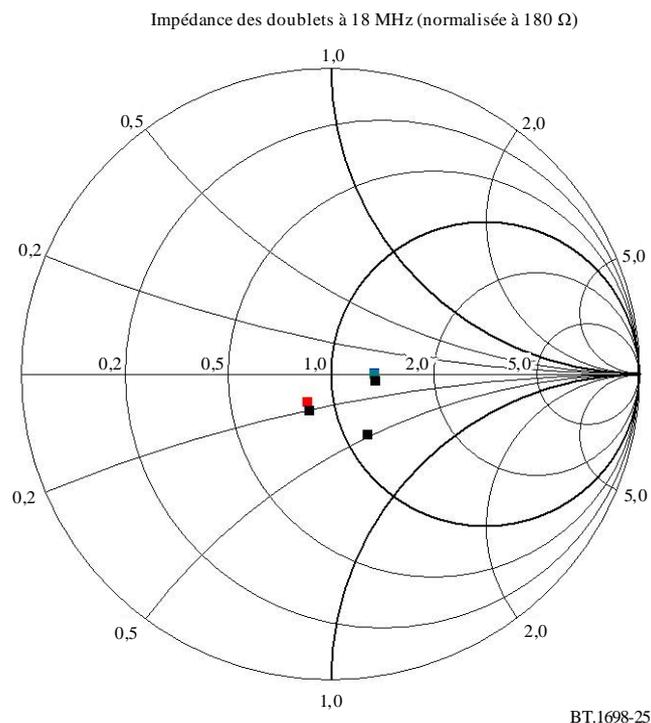
2.2.1 Prédiction

2.2.1.1 Remarques sur le modèle

Afin d'adapter au mieux le modèle décrit précédemment au système d'antenne réel, il est nécessaire de connaître la quantité correcte de puissance à l'entrée de chaque doublet, en tenant compte des pertes dans la ligne de transmission et des pertes dues aux défauts d'adaptation.

Afin d'appliquer la valeur de tension appropriée à chaque doublet, on a calculé l'impédance d'entrée de chaque doublet dans la simulation. Les valeurs sont représentées à la Fig. 25.

FIGURE 25
Impédance d'entrée des doublets, normalisée à 180 Ω



Ensuite, pour chaque doublet, une valeur commune de la résistance égale à 180 Ω a été adoptée, valeur moyenne obtenue par la simulation. Noter que cette décision peut être à l'origine d'inexactitudes dans les résultats de la prédiction.

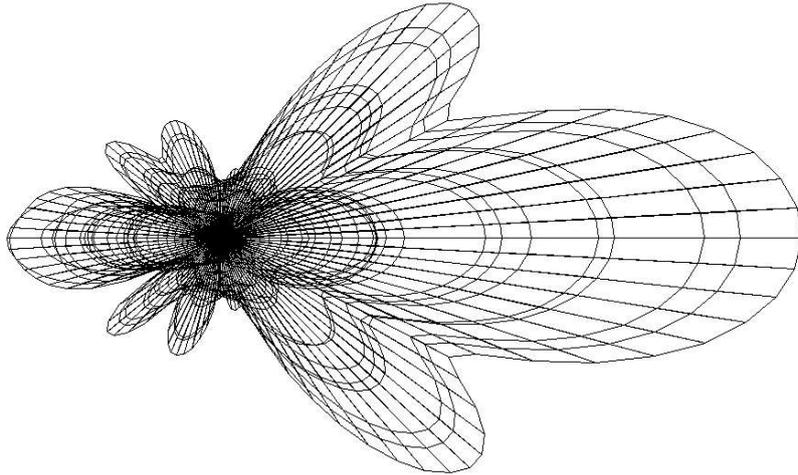
Étant donné que les composantes réactives de l'impédance d'entrée complexe sont faibles, il n'est pas nécessaire d'ajuster la puissance de l'émetteur pour compenser les pertes de puissance dues au défaut d'adaptation et à la réflexion résultante entre l'émetteur et l'antenne.

On notera la dispersion faible – mais non inexistante – des valeurs de résistance près de 180 Ω et l'absence substantielle de composantes réactives.

2.2.1.2 Évaluations du champ lointain

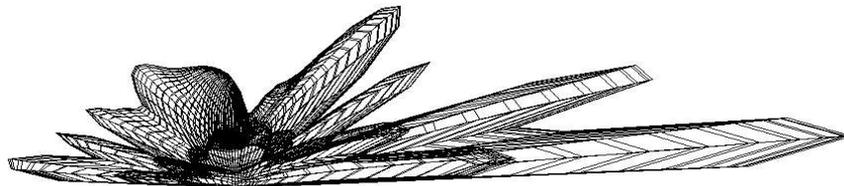
Afin de mieux comparer le comportement du modèle avec des antennes réelles (voir les Figs 11 et 12), on a calculé les diagrammes de rayonnement. Les résultats sont présentés à la Fig. 26 (plan horizontal), à la Fig. 27 (plan vertical) et à la Fig. 28 (vue frontale).

FIGURE 26

Diagramme de rayonnement dans le plan horizontal

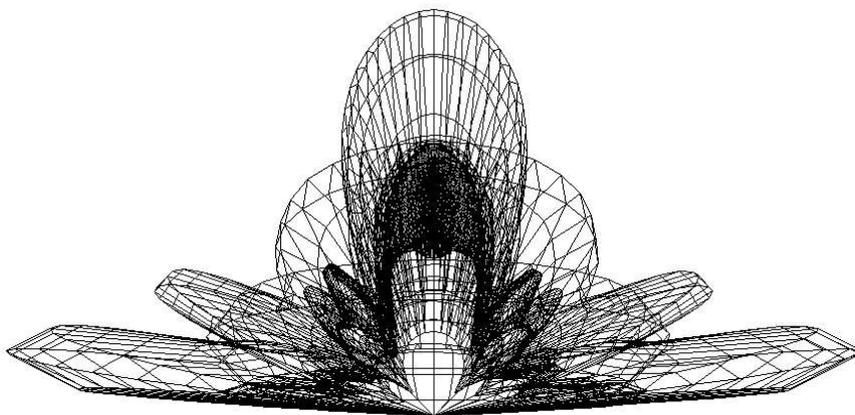
BT.1698-26

FIGURE 27

Diagramme de rayonnement dans le plan vertical

BT.1698-27

FIGURE 28

Diagramme de rayonnement, vue de face

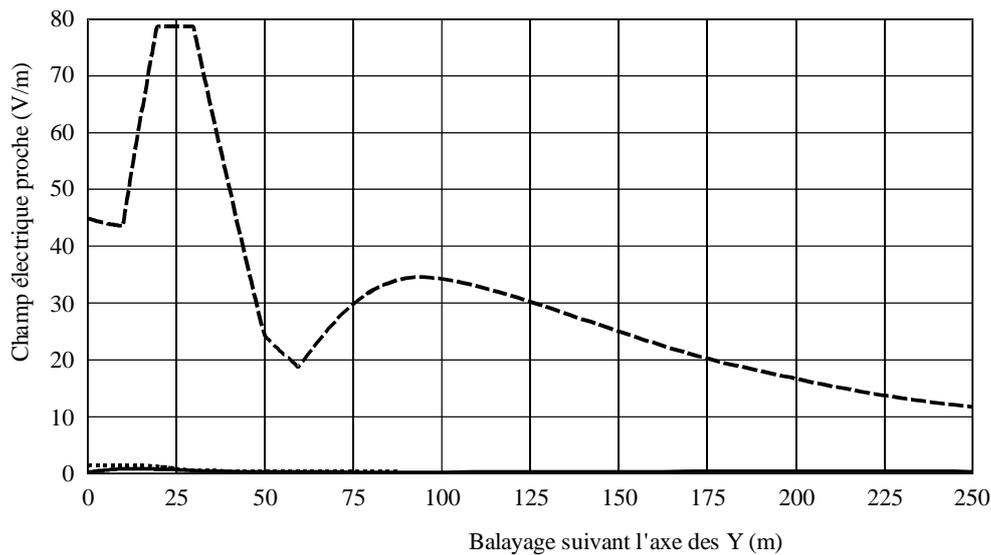
BT.1698-28

2.2.1.3 Résultats de la prévision du champ dans la zone proche

Une prévision a été faite en calculant les composantes x, y, z des champs E et H dans la direction du gain maximal de l'antenne (axe des Y) à 2 m au-dessus du sol (axe Z = 2). Les valeurs calculées sont représentées à la Fig. 29 (champ E) et à la Fig. 30 (champ H). La forte influence du terrain tant dans les évaluations que dans les mesures peut introduire une différence supplémentaire entre les deux résultats. Pour montrer la forte influence du terrain, on a également calculé les valeurs des champs E et H en faisant varier la hauteur du point d'évaluation au-dessus du sol (axe Z) de 0 à 9 m à une distance fixe de 60 m (Y = 60). Le comportement est illustré à la Fig. 31 (champ E) et à la Fig. 32 (champ H).

FIGURE 29

Intensité du champ E électrique proche calculé dans la zone 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.

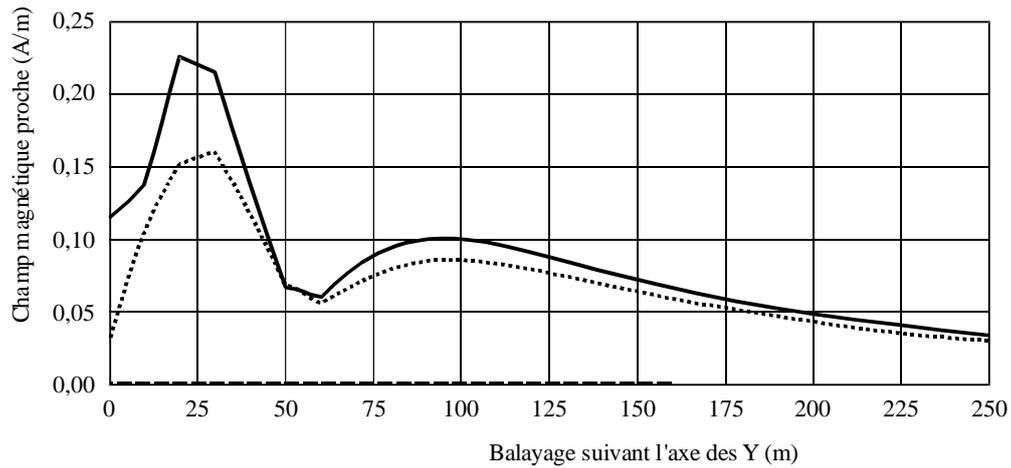
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Y, constantes: X = 0, Z = 2; CORT18

BT.1698-29

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

FIGURE 30

Intensité du champ H magnétique proche calculé dans la zone 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

BT.1698-30

La principale contribution est la composante y. La composante z est inférieure, tandis que la composante x est égale à 0. L'axe horizontal représente la distance en mètres par rapport à l'antenne (balayage en 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 31

Champ calculé E à une distance de 60 m de l'antenne (Y = 60) à différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage 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.

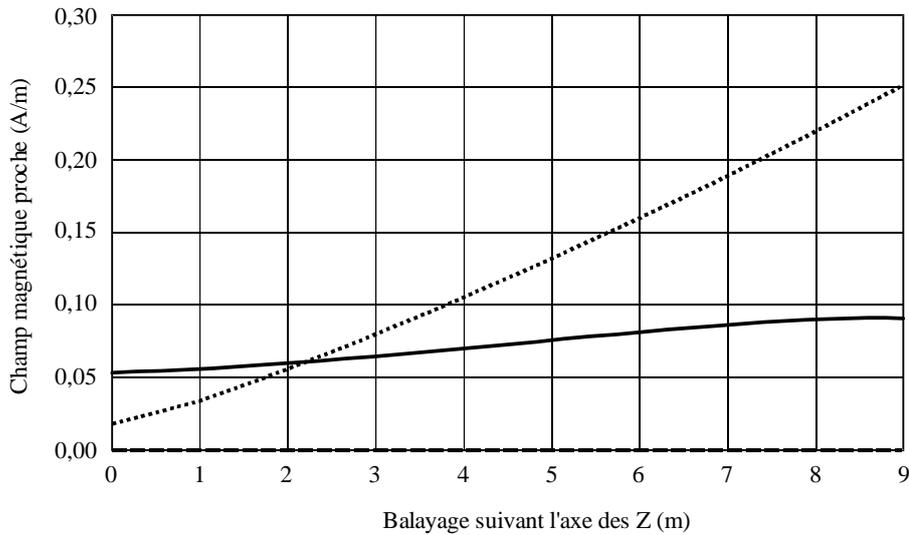
- Champ électrique proche, mag (X), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Y), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18
- Champ électrique proche, mag (Z), balayage sur Z, constantes: X = 0, Y = 60; CORT18

BT.1698-31

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

FIGURE 32

Champ calculé H à une distance de 60 m de l'antenne (Y = 60) à différentes hauteurs comprises entre 0 et 9 m (balayage Z)



18 MHz, champ magnétique 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 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

BT.1698-32

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 relativement constante) est également évidente.

2.2.2 Mesures

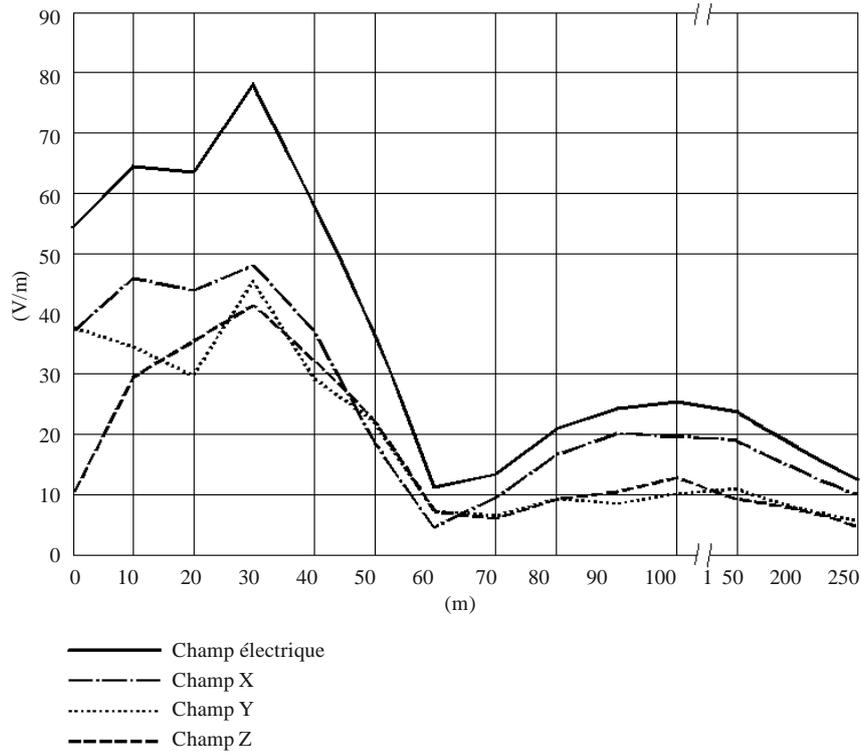
Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un mesureur de champ à large bande installé sur un chariot diélectrique déplacé par un opérateur placé loin du site de l'antenne. On évite ainsi toute perturbation des champs E/H.

2.2.2.1 Résultats des mesures

Les valeurs mesurées sont présentées à la Fig. 33 (champ E) et à la Fig. 34 (champ H). Les Figures 33 et 34 sont directement comparables aux Figs 29 et 30 respectivement.

FIGURE 33

Intensité du champ E mesurée dans la zone proche

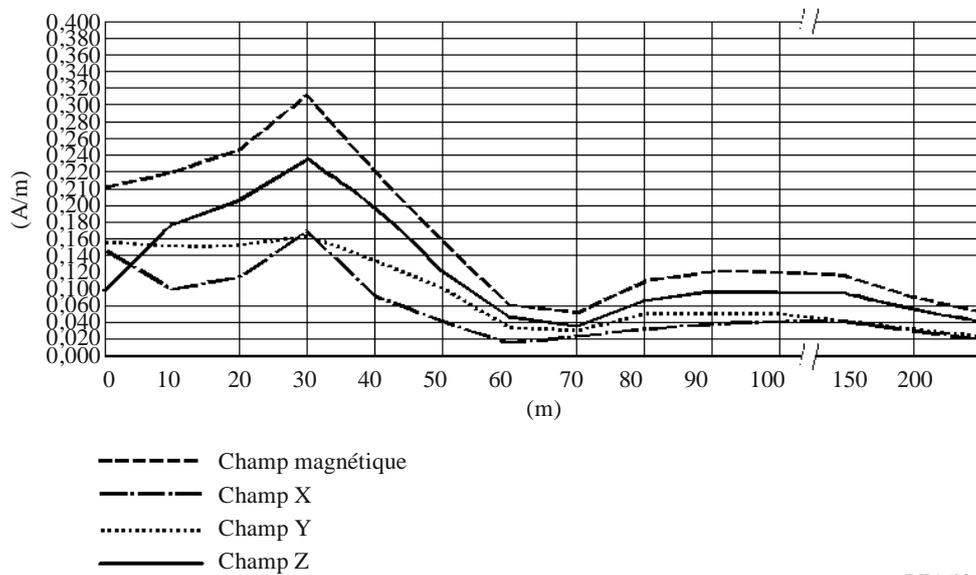


BT.1698-33

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

FIGURE 34

Intensité du champ H mesurée dans la zone proche



BT.1698-34

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

2.3 Comparaison entre les mesures et les prévisions de l'intensité du champ dans la zone proche

2.3.1 13 MHz

À une distance inférieure à 40 m, la prévision a donné des valeurs, pour les champs E et H, supérieures aux valeurs mesurées; les valeurs maximales de E et H ont été obtenues à une distance de 10 à 20 m de l'antenne, tant dans les résultats de la simulation que dans les mesures.

Aussi bien dans les valeurs prévues que dans les valeurs mesurées, il y a un «minimum» évident à 40 m de l'antenne, plus profond dans la prévision que dans la mesure.

Le second «maximum» atteint sa 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.

À des distances plus grandes, à 250 m de l'antenne, tous les champs s'approchent de valeurs similaires entre les prévisions et les mesures.

2.3.2 18 MHz

À une distance inférieure à 40 m, la prévision a donné des valeurs, pour les champs E et H, supérieures aux valeurs mesurées; les valeurs maximales de E et H ont été obtenues à une distance de 10 à 20 m de l'antenne, tant dans les résultats de la simulation que dans les mesures.

Un second «maximum» est atteint à 100 m, tant pour la prévision que pour la mesure, pour les champs E et H, avec une valeur inférieure pour le champ E mesuré. À une distance supérieure à 60 m de l'antenne, le champ H prend la même valeur pour les prévisions et les mesures.

3 Conclusions

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

Les valeurs ne concordent généralement pas parfaitement, comme on aurait pu s'y attendre; toutefois, il n'y a pas de différences substantielles entre elles, compte tenu de l'incertitude de l'instrumentation, de l'incertitude quant à la planéité de la surface de la Terre à proximité de l'antenne (non prise en compte dans les simulations, même s'il est clair que l'intensité du champ dépend fortement de la hauteur du point de mesure) et de la simplicité imposée du modèle. Les différences sont plus grandes au voisinage de l'antenne (c'est-à-dire le premier maximum atteint environ 10 m), jusqu'à 50%, et diminuent lorsque la distance augmente; à 250 m, les différences sont assez faibles.

Les raisons de ces différences résident dans les difficultés de mesure en champ proche, les incertitudes inhérentes à l'instrumentation, la simplicité du modèle, la présence de quelques objets à proximité de l'antenne (structures métalliques, les deux réseaux supportant les doublets et le réseau d'adaptation) qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle, ainsi que le réseau d'adaptation et ses émissions. Enfin, le terrain a été modélisé avec ses valeurs électriques types.

Pour effectuer les prévisions des champs E et H à l'aide d'un modèle, nous recommandons ce qui suit:

Modèle d'antenne: les dimensions physiques des éléments rayonnants et passifs doivent être étudiées avec soin ainsi que l'impédance d'entrée complexe du système. Pour simplifier un système complexe, c'est-à-dire un réseau d'éléments rayonnants, il peut être commode 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 est nécessaire de compenser le défaut éventuel d'adaptation entre les générateurs et les éléments rayonnants en introduisant des éléments d'adaptation artificiels ou des réseaux simples, ou en ajustant la puissance affectée à l'émetteur. Le résultat final est tout à fait insensible à la présence de petites discordances qui ne nécessitent pas de modélisation.

Subdivision des segments: il suffit de représenter les systèmes d'antennes filaires avec des segments n'excédant pas $\lambda/20$.

Modèle de terrain: il est nécessaire de donner les valeurs exactes de la permittivité et de la conductivité, en particulier dans le cas d'un champ E polarisé horizontalement.

Puissance d'émission: il est important de prendre en compte les pertes dans les lignes de transmission, le réseau d'adaptation, la résistance des jonctions, les désadaptations à la charge. Dans certains cas, il est opportun d'ajuster artificiellement la valeur exacte de la puissance afin de tenir compte des diverses causes d'affaiblissement sans compliquer le modèle du système d'antenne.

Hauteur des points de mesure au-dessus du sol: dans de nombreux cas, ce paramètre est très important s'il s'agit d'une comparaison entre les mesures et les prévisions. En fait, la forte influence de l'altitude peut être notée dans la valeur des champs, et, si le terrain est modélisé comme un plan, les erreurs peuvent être importantes, par rapport à la mesure. Dans tous les cas où les éléments rayonnants sont à proximité du terrain et où le terrain n'est pas tout à fait plat, les résultats des prévisions doivent être pris avec prudence.

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

Pièce jointe 3 à l'Annexe 1

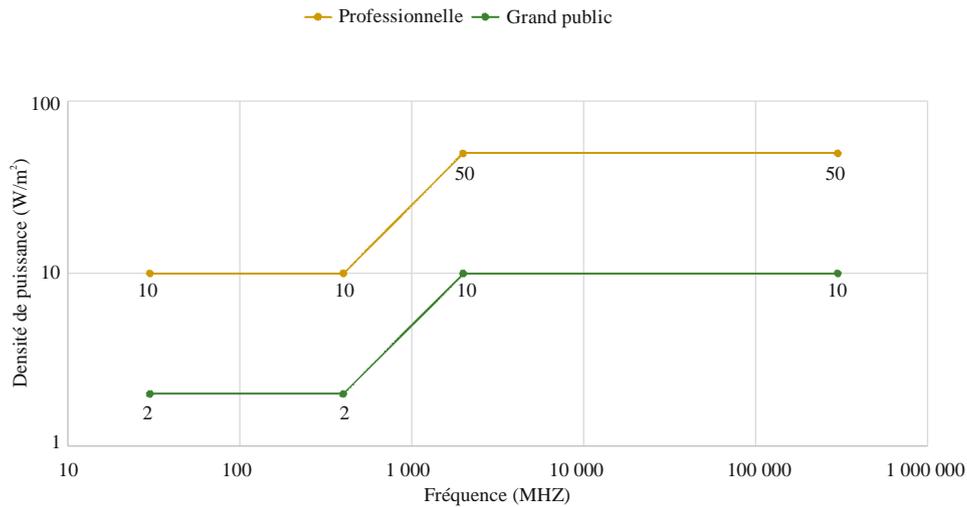
Limites et niveaux internationaux

Comme indiqué dans l'introduction, il n'existe pas de norme mondiale unique utilisée pour fixer des limites. Toutefois, les lignes directrices de l'ICNIRP et la norme de l'IEEE adoptent une approche analogue. Il s'agit de fixer des limites en termes de restrictions de base (telles que le taux d'absorption spécifique) difficiles à mesurer dans la pratique; ensuite, des niveaux de référence supplémentaires sont fournis en termes d'intensité de champs qui peuvent être mesurés plus facilement et peuvent être utilisés pour faciliter la détermination de la conformité.

La Recommandation UIT-T K.91 «Guide d'évaluation et de surveillance de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques radioélectrique», l'Appendice I «Limites d'exposition» s'appuie sur les lignes directrices de l'ICNIRP (2010 [2] et 2020 [1]), sur la norme IEEE C95.1-2019 [3] et sur le Rapport 2021 sur la Question 7/2 de l'UIT-D. L'Appendice I contient les lignes directrices de l'ICNIRP (éditions de 2010 et de 2020) en vigueur, présente de manière détaillée des tableaux et des figures de l'édition 2020 de l'ICNIRP, fournit des informations détaillées sur la norme IEEE C95.1-2019 et explique l'exposition simultanée à des sources multiples.

FIGURE 35

Tableau 5 de l'ICNIRP (2020), densité de puissance pour l'exposition professionnelle et l'exposition du public à 30 MHz – 300 GHz



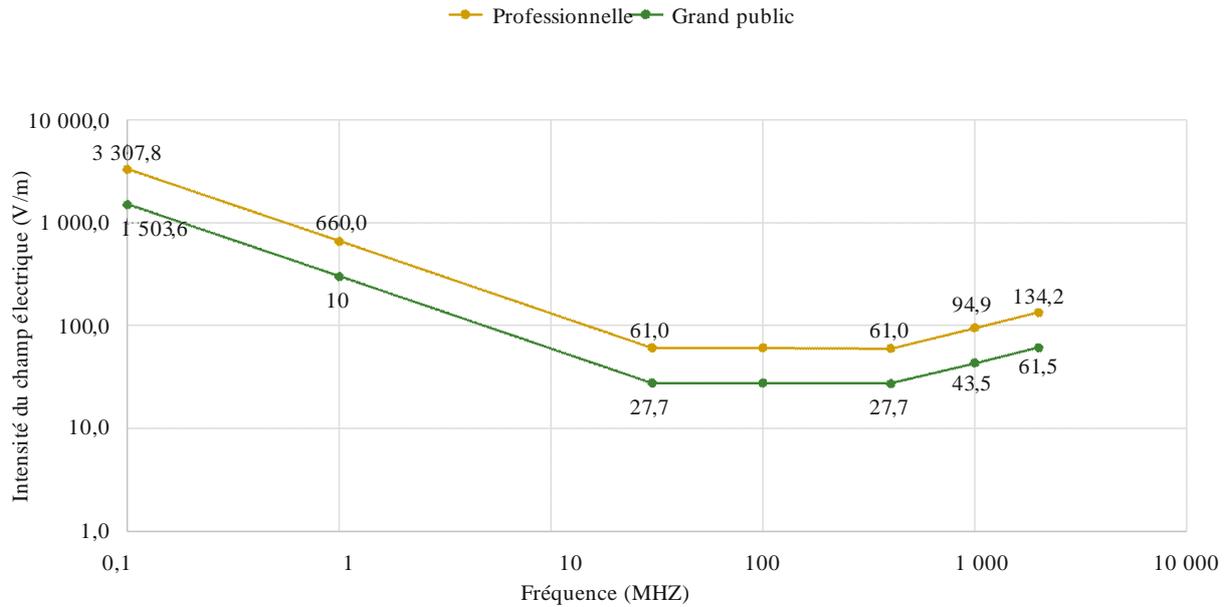
BT.1698-35

La Figure 35 précédente et la Fig. 36² suivante [4] révisée en 2021 du Chapitre 9 décrivent les différences entre les niveaux d'exposition au champ et à la densité de puissance de l'ICNIRP (2020) pour l'exposition professionnelle et l'exposition du public, en moyenne sur 30 minutes et sur l'ensemble du corps. Le rapport de densité de puissance de 5 dans le Tableau 5 de l'ICNIRP (2020) (par exemple à 30-400 MHz, rapport en watts 50/10) donne un rapport V/m de $61,0/27,7 = 2,2 \approx \sqrt{5}$.

² Mazar 2016, Wiley «Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques» (révisé en 2021), Chapitre 9, Figs 9.6 et 9.7. Voir également la Fig. I.1 de la Recommandation UIT-T K.91.

FIGURE 36

Comparaison du Tableau 5 de l'ICNIRP (2020), intensité de champ pour l'exposition professionnelle et l'exposition du public, à la bande 0,1-2 000 MHz, moyenne sur 30 minutes et sur l'ensemble du corps



BT.1698-36

En avril 2022, l'ICNIRP a publié une nouvelle déclaration intitulée «Description du système indépendant de directives fondées sur les meilleures pratiques de l'ICPRNI sur la protection des personnes et de l'environnement contre l'exposition aux rayonnements non ionisants».

Pièce jointe 4 à l'Annexe 1

Complément d'information sur la modulation

1 Caractéristiques des émissions radioélectriques

Le Règlement des radiocommunications (RR) classe les émissions des émetteurs radioélectriques en fonction des largeurs de bande requises et des caractéristiques fondamentales et facultatives de l'émission. La classification complète se compose de neuf caractères, mais seules trois caractéristiques fondamentales entrent en ligne de compte pour les considérations de sécurité RF. Ce sont:

- 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 fondé sur les informations données dans le RR, énumère les différents caractères qui sont utilisés.

TABLEAU 2

Caractères, relevant de la radiodiffusion, utilisés pour définir la classe d'émission, sur la base des renseignements donnés dans le RR

Caractère 5 Le type de modulation de la porteuse principale		Caractère 6 La nature du ou des signaux qui modulent la porteuse principale		Caractère 7 Le type d'information à transmettre	
A	Modulation d'amplitude: double bande latérale	1	Une seule voie contenant de l'information analogique	E	Téléphonie, y compris la radiodiffusion sonore
R	Modulation d'amplitude: bande latérale unique, onde porteuse réduite ou de niveau variable	7	Deux voies ou plus contenant de l'information quantifiée ou numérique	F	Télévision (vidéo)
J	Modulation d'amplitude: bande latérale unique, onde porteuse supprimée	9	Deux canaux ou plus contenant un mélange de canaux analogiques et numériques		
C	Modulation d'amplitude: bande latérale résiduelle				
X	Autres cas non couverts				

Le Tableau 3 contient des précisions sur les classes d'émission les plus courantes pour le service de radiodiffusion.

TABLEAU 3

Classes d'émission les plus courantes pour le service de radiodiffusion

Système de radiodiffusion	Description de l'émission	Classe d'émission
Images de télévision analogique	VSB	C3F
Son de télévision analogique	Son FM ou AM	F3E ou A3E
ATSC	VSB	C7W
DVB-T/T2/H	COFDM	X7F
ISDB-T	SOFDM	X7F
RNIS-T (Système multimédia F)	MRFO	X7W
T-DMB	COFDM	X7W
T-DAB	COFDM	X7E
DRM	COFDM	X7E
Radiodiffusion sonore à ondes décamétriques, hectométriques et kilométriques	AM	A3E/A8E
Radiodiffusion sonore FM	FM	F3E/F8E

2 Expression de la puissance de l'émetteur et de l'intensité du champ en fonction du type de modulation

On peut obtenir des informations sur la puissance d'émission fournie à l'antenne et sur le type de modulation auprès de l'organisme d'émission, qui est responsable de l'exploitation des équipements sur un site particulier. Il est 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 précision les valeurs mesurées ou calculées avec les niveaux de référence.

À titre d'exemple, on considère un émetteur de radiodiffusion sonore en ondes hectométriques (c'est-à-dire une émission de type A3E). On suppose que les calculs ou les mesures tiennent compte uniquement de la puissance de la porteuse, mais que les niveaux de référence tiennent également compte des composantes de modulation (en termes de puissance d'émission, cela correspond à la puissance moyenne). En outre, on suppose que seules les valeurs quadratiques moyennes sont utilisées.

Pour comparer les valeurs calculées ou mesurées avec les niveaux de référence, il faut effectuer l'une des transformations suivantes:

- les valeurs calculées/mesurées doivent être modifiées pour inclure les composantes de modulation; ou
- les niveaux dérivés doivent être modifiés pour correspondre aux valeurs de puissance de la porteuse seulement, c'est-à-dire sans composantes de modulation.

Le Tableau 4 donne les facteurs de multiplication qui relie un type de notation de puissance à un autre (ces différentes notations de puissance sont définies dans le RR). Dans le cas d'une émission A3E, représentée par A*E dans le Tableau 4, on constate que la puissance moyenne, P_m , est égale à 1,5 fois la puissance de la porteuse, P_c .

Le Tableau 4 suppose un taux de modulation de 100%. Dans la pratique, le taux de modulation d'un émetteur de radiodiffusion sera souvent inférieur à cette valeur. Prenons à nouveau l'exemple d'une émission A3E mais avec un taux de modulation m , où $m = 1$, représente 100%, la puissance de crête sera de $(1 + m)^2 P_c$ et la puissance moyenne de $[1 + 2(m/2)^2] P_c$.

NOTE – Les valeurs ci-dessus se rapportent à des puissances, de sorte que la racine carrée des coefficients de conversion donnés dans le Tableau 4 doit être utilisée lorsqu'il s'agit des champs. Ainsi, dans l'exemple ci-dessus de la radio AM, l'intensité de champ efficace de la porteuse seule doit être multipliée par $\sqrt{1,5}$ pour obtenir l'intensité de champ de moyenne quadratique, qui inclut les composantes de modulation. Inversement, le niveau dérivé (y compris les composantes de modulation) doit être divisé par $\sqrt{1,5}$ pour obtenir un niveau dérivé équivalent pour la porteuse uniquement.

La valeur quadratique moyenne du champ en champ lointain peut être calculée à partir de la puissance connue, à l'aide de l'équation (7); le type d'énergie approprié à utiliser (c'est-à-dire P_m ou P_p) est indiqué dans le Tableau 5.

TABLEAU 4

Relation entre la puissance de la porteuse, la puissance moyenne, la puissance de crête et la puissance instantanée maximale, pour différentes classes d'émission (chiffres correspondant au cas le plus défavorable)

Classe d'émission (caractéristiques fondamentales) ^{(1), (2)}	Type de puissance connu								
	Puissance de la porteuse, P_c			Puissance moyenne, P_m			Puissance de crête, P_p		
	Facteur permettant de déterminer:			Facteur permettant de déterminer:			Facteur permettant de déterminer:		
	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p	P_c	P_m	P_p
A*E	1	1,5	4	0,67	1	2,67	0,25	0,38	1
C*F ⁽³⁾									
Modulation négative	–	–	–	–	1	1,85	–	0,54	1
Modulation positive					1	1,42		0,87	1
F*... ⁽⁴⁾	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
GX7F	1	1	1	1	1	1	1	1	1
X7W	1	1	1	1	1	1	1	1	1

⁽¹⁾ Voir le Tableau 1 pour plus d'information sur le code à 3 symboles utilisé pour décrire les trois caractéristiques fondamentales d'un type de transmission.

⁽²⁾ Un * indique que la deuxième caractéristique (c'est-à-dire la nature du signal modulant) n'est pas pertinente pour l'examen des risques.

⁽³⁾ La puissance de la porteuse, P_c , n'est pas clairement définie.

⁽⁴⁾ La troisième caractéristique n'est pas pertinente pour la prise en compte des risques.

Ces facteurs sont donnés pour X7E, X7F et X7W *lorsque* la puissance est mesurée sur l'ensemble du canal (par exemple 1,5 MHz pour la DAB et 8 MHz pour la DVB).

TABLEAU 5

Relation entre certaines notations d'intensité de champ et certaines notations de puissance

Pour calculer	Puissance d'utilisation exprimée par
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 de crête	Puissance de crête, P_p
La valeur de crête (maximale) du champ équivalent	Puissance de crête, $P_p^{(1)}$

⁽¹⁾ La valeur de crête du champ équivalent est déterminée à partir de la puissance de crête, P_p , à l'aide de la valeur de crête/valeur efficace. facteur de correction. Ce facteur est de 21/2 pour une porteuse sinusoïdale.

Pièce jointe 5 de l'Annexe 1

Méthodes d'évaluation supplémentaires

1 Procédures numériques

La présente section donne un bref aperçu des diverses méthodes numériques. Il convient de noter que les méthodes numériques sont également examinées dans la Recommandation UIT-T K.61. Certains programmes commerciaux sont disponibles, par exemple CST, HFSS et WIPL-D.

Les procédures analytiques ne peuvent être utilisées que pour calculer les propriétés électromagnétiques pour quelques cas particuliers et géométries. Pour résoudre des problèmes généraux, il faut appliquer des techniques numériques. Les méthodes numériques les plus courantes pour calculer les champs électromagnétiques provenant d'une source émettrice ou des champs internes et le taux d'absorption spécifique dans les corps biologiques sont énumérées ci-dessous. La technique numérique la mieux adaptée à tel ou tel problème dépend de la gamme de fréquences considérée, des structures géométriques à modéliser et du type de situation d'exposition (champ proche ou champ lointain).

Quelques méthodes courantes de modélisation numérique sont indiquées ci-dessous:

- Optique physique (PO)
- Théorie physique de la diffraction (PTD)
- Optique géométrique (GO)
- Théorie géométrique de la diffraction (GTD)
- Théorie uniforme de la diffraction (UTD)
- Méthode des courants équivalents (MEC)
- Méthode des moments (MOM)
- Méthode multipolaire multiple (MMP)
- Méthode de la différence finie dans le domaine temporel (FDTD)
- Méthode des éléments finis (FEM)
- Méthode d'impédance

Une évaluation doit être effectuée, pour chaque application, afin d'établir laquelle des méthodes ci-dessus est la plus appropriée pour résoudre un problème donné. Par exemple, les optiques physique et géométrique ne s'appliquent pas en champ proche.

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

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

1.1 Méthode des moments (MOM)

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

On peut modéliser des structures techniques jusqu'à trois dimensions en tenant compte des paramètres de leurs matériaux (constante diélectrique complexe) ainsi que de ceux du sol. La modélisation fonctionne avec des fils qui sont minces par rapport à la longueur d'onde et, en principe, est capable de représenter des surfaces aussi. La limitation de cette méthode réside dans le fait que la modélisation de structures étendues et complexes peut consommer trop de temps – et trop de mémoire – pour l'ordinateur.

La méthode MOM est une technique qui a été largement utilisée pour résoudre des problèmes électromagnétiques et pour effectuer des calculs SAR dans des modèles par blocs de corps biologiques. Dans la MOM, les champs électriques à l'intérieur d'un corps biologique sont calculés au moyen d'une solution de fonction de Green des équations intégrales de Maxwell.

1.2 Méthode de transformation de Fourier rapide/gradient conjugué (TFR/CG)

La méthode TFR/CG est un perfectionnement ultérieur de la méthode MOM. On utilise des algorithmes itératifs fondés sur la TFR et la procédure de gradient pour résoudre les équations linéaires dérivées de la MOM.

1.3 Méthode de la différence finie dans le domaine temporel (FDTD)

La FDTD est une méthode numérique permettant de résoudre les équations différentielles de Maxwell dans le domaine temporel. Elle peut être utilisée pour calculer la distribution interne et externe des champs électromagnétiques et du taux SAR dans les corps biologiques pour les expositions en champ proche et en champ lointain. Dans le FDTD, le temps et l'espace sont discrétisés, et un corps biologique est modélisé en attribuant les valeurs de permittivité et de conductivité aux cellules spatiales qu'il occupe. La mémoire informatique nécessaire est proportionnelle au nombre de cellules spatiales. La méthode FDTD est considérée comme la méthode de calcul du taux SAR la plus prometteuse, mais pour des calculs précis, des ordinateurs très puissants sont nécessaires.

1.4 Méthode multipolaire multiple (MMP)

La méthode MMP est fondée sur des solutions analytiques à des équations de champ qui ont un multipôle en un point de l'espace; elle est utilisée conjointement avec la méthode multipolaire généralisée (GMP). La procédure MMP est particulièrement adaptée à la simulation de corps dits «à diffusion avec perte», qui sont proches de sources de rayonnement, c'est-à-dire dans le champ proche immédiat.

1.5 Méthode d'impédance

La méthode de l'impédance a été utilisée avec succès pour résoudre des problèmes de dosimétrie lorsque des approximations quasi statiques peuvent être faites. Pour les calculs du SAR dans le corps humain, cette méthode s'est révélée très efficace à des fréquences allant jusqu'à 40 MHz. Dans la méthode de l'impédance, le corps biologique est modélisé par un réseau tridimensionnel d'impédances complexes.

2 Calculs d'intensité du champ

La plupart des méthodes énumérées ci-dessus peuvent être utilisées pour calculer les niveaux d'intensité du champ produit par des éléments rayonnants électromagnétiques. La précision des résultats dépend beaucoup de la qualité de la modélisation de l'élément rayonnant (par exemple l'antenne). Si des objets situés à proximité de l'élément rayonnant, entre l'élément rayonnant et le point de prévision, ou proches du point de prévision du champ, affectent notablement les niveaux du champ, ces objets devraient également être modélisés.

2.1 Analyse numérique des structures filaires – Exemple

Elle donne un aperçu d'une méthode possible pour déterminer les niveaux du champ au voisinage d'une antenne-rideau en ondes décimétriques, fondée sur la formulation de l'équation dite à deux potentiels pour la distribution du courant le long des fils. On résout cette équation en utilisant la méthode MOM avec une approximation polynomiale du courant.

On considère une structure arbitraire, située dans le vide et assemblée à partir de segments de fil droit parfaitement conducteurs. Selon les conditions aux limites, sur les surfaces des fils, la composante tangentielle du champ électrique total doit être nulle, c'est-à-dire:

$$(E + E_i)_{\tan} = 0 \quad (17)$$

où:

E : champ électrique produit par les courants et les charges de la structure filaire

E_i : champ électrique appliqué, qui modélise l'excitation du système.

Le champ appliqué peut être, par exemple, le champ électrique d'une onde plane incidente sur la structure (lors de l'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 (lors de l'analyse des antennes d'émission).

Le champ électrique produit par les courants et les charges des fils peut s'exprimer en termes de potentiel vectoriel magnétique, A , et de potentiel scalaire électrique, V , comme suit:

$$E = -j\omega A - \text{grad } V \quad (18)$$

où:

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

Les deux potentiels, à leur tour, peuvent s'exprimer en termes de densités des courants de surface (\mathbf{J}_s) et des charges (ρ_s), qui sont liées par l'équation de continuité. Ensuite, les courants et charges de surface sont approximés par les courants et les charges de ligne (approximation du fil mince) et la structure du fil est divisée en N segments (chacun d'eux ayant un axe local, s_m). Enfin, l'équation à deux potentiels (également appelée équation du potentiel scalaire vectoriel) pour la distribution du courant est obtenue sous la forme:

$$\sum_{m=1}^N \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m I_m(s_m) g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{dI_m(s_m)}{ds_m} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m = \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j\omega\mu_0} \quad (19)$$

où:

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

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

$$g(r_a) = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-jk r_a)}{r_a} : \text{ correspondant à la fonction de Green}$$

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

L'équation (19) est une équation différentielle intégrale pour la distribution du courant, et elle ne peut être résolue que numériquement. À cette fin, les directives générales du modèle MOM sont suivies et rapprochent la fonction inconnue $I_m(s_m)$ par une série de fonctions connues (fonctions de base), avec des coefficients de pondération inconnus. Les fonctions de puissance simples sont choisies comme fonctions de base, ce qui équivaut à l'approximation polynomiale de la distribution du courant, c'est-à-dire:

$$I_m(s_m) = \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \quad (20)$$

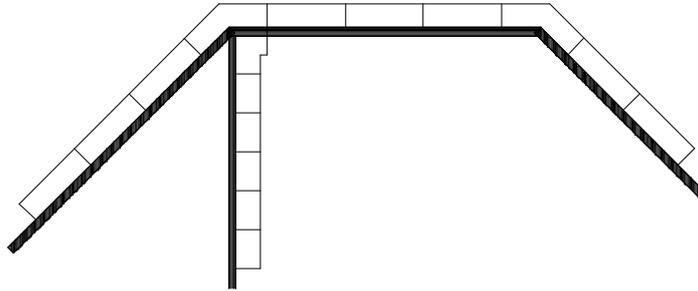
où:

h_m : longueur du segment

I_{mi} : coefficients de pondération.

L'équation (19) ne peut pas être satisfaite exactement en tous les points le long des segments de fil, mais seulement approximativement. Conformément à la MOM, un ensemble de fonctions de pondération est sélectionné et les produits internes de l'équation (19) et ces fonctions sont évalués. Les fonctions de pondération sont supposées être des impulsions. Chaque impulsion est une constante unitaire, définie sur un sous-segment court, et zéro dans le cas contraire. La Figure 37 représente une distribution type des impulsions.

FIGURE 37
Répartition type des fonctions de pondération des impulsions utilisées
dans les programmes AWAS



BT.1698-37

Pour une impulsion définie sur le sous-segment (s_{p1}, s_{p2}) le long de l'axe du tronçon de fil p , l'évaluation du produit scalaire donne l'équation (21):

$$\sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \left\{ \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \int_0^{h_m} \mathbf{u}_p \cdot \mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) ds_m ds_p + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} [g(r_a)_{s_{p2}} - g(r_a)_{s_{p1}}] ds_m \right\} \quad (21)$$

$$+ \sum_{i=0}^{n_p} I_{pi} \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{Z'(s_p)}{j \omega \mu_0} \left(\frac{s_p}{h_p} \right)^i ds_p = \int_{s_{p1}}^{s_{p2}} \frac{\mathbf{u}_p \cdot \mathbf{E}_i}{j \omega \mu_0} ds_p$$

Dans cette équation, \mathbf{u}_p est le vecteur unitaire du tronçon de fil p et Z' est l'impédance linéique d'une charge d'impédance possible répartie le long du segment. Lorsqu'elles sont évaluées pour toutes les impulsions, les équations de la forme (21) comprennent un système d'équations linéaires en I_{mi} , qui peuvent être résolues numériquement.

Une fois les coefficients I_{mi} connus, on détermine la distribution approximative du courant le long des tronçons de fil et on peut évaluer diverses caractéristiques de la structure filaire. Cette partie de la Recommandation traite essentiellement des champs électriques et magnétiques proches. Le champ électrique peut être évalué en fonction des deux potentiels, de la même manière que lorsque l'on déduit l'équation des deux potentiels, c'est-à-dire:

$$\mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left[\mathbf{u}_m \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i g(r_a) + \frac{1}{k^2} \frac{i}{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^{i-1} \text{grad } g(r_a) \right] ds_m \quad (22)$$

Le champ magnétique peut s'exprimer en termes de potentiel vectoriel magnétique comme suit:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \text{rot } \mathbf{A} \quad (23)$$

Lorsque ce potentiel est exprimé en termes de courants filaires, on obtient finalement:

$$\mathbf{H} = - \sum_{m=1}^N \sum_{i=0}^{n_m} I_{mi} \int_0^{h_m} \left(\frac{s_m}{h_m} \right)^i \mathbf{u}_m \times \text{grad } g(r_a) ds_m \quad (24)$$

3 Dosimétrie

L'application des concepts de dosimétrie permet de relier les champs externes (c'est-à-dire à l'extérieur du corps) et internes, la densité de courant induit et le taux d'absorption d'énergie dans les tissus. Le développement de la dosimétrie expérimentale et numérique a été complémentaire. Les deux approches nécessitent des approximations pour la simulation de l'exposition des personnes; toutefois, la mise au point de matériaux assimilables à des tissus et de sondes peu perturbatrices 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 RF avec le corps.

Alors que la densité de courant et le champ électrique interne sont les grandeurs les plus clairement liées aux effets biologiques aux basses fréquences, c'est le SAR, qui devient la grandeur la plus importante à mesure que les fréquences augmentent vers des longueurs d'onde comparables aux dimensions du corps humain.

Dans la plupart des situations d'exposition, le taux SAR ne peut être déduit que des intensités de champ mesurées dans l'environnement au moyen de modèles dosimétriques. Aux fréquences inférieures à 100 MHz, des techniques non intrusives ont été utilisées pour mesurer le courant induit et, dans des champs uniformes étendus, les champs électriques externes ont été rapportés au courant induit en fonction de la fréquence. Dans la région de résonance corporelle, des expositions d'une importance pratique se produisent dans le champ proche réactif, où le couplage entre le champ incident et le corps est difficile à établir en raison de la non-uniformité du champ et de la modification de l'alignement entre le champ et le corps. En outre, des augmentations localisées de la densité de courant et du taux SAR peuvent apparaître dans certaines parties du corps en raison de la section transversale géométrique restreinte des tissus les plus conducteurs.

Les grandeurs dosimétriques peuvent être calculées à l'aide de procédures numériques et de modèles de calcul appropriés du corps humain. Par ailleurs, ces grandeurs peuvent être mesurées à l'aide de modèles physiques appropriés (fantômes).

3.1 Calculs du taux d'absorption spécifique (SAR)

Étant donné qu'il est difficile de mesurer le taux SAR moyenné ou le taux SAR crête local dans de nombreuses situations d'exposition, on peut utiliser les calculs numériques de plusieurs des techniques numériques susmentionnées pour estimer la distribution du taux SAR dans un corps biologique exposé à des rayonnements électromagnétiques en champ proche ou en champ lointain, par exemple la méthode FDTD, la méthode MOM et la méthode MMP.

La méthode la mieux adaptée 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. Chaque méthode nécessite une expérience en biophysique et en analyse numérique.

Pour utiliser l'un de ces modèles, il faut disposer d'un modèle numérique géométrique tridimensionnel du corps ou de la partie du corps exposé. Les propriétés électriques à la fréquence d'exposition doivent être connues pour les différentes parties du corps. Selon la précision requise, des modèles de complexité différente peuvent être utilisés. Dans certaines situations, des formes simples comme des sphères et des cylindres sont appropriées pour modéliser le corps. Les propriétés diélectriques des tissus humains sont données dans la littérature. L'utilisation d'images par résonance magnétique (RM) d'un corps humain permet d'élaborer des modèles numériques de corps humain très complexes et précis. On a utilisé des modèles RM avec plusieurs types de tissus différents et une résolution spatiale inférieure à quelques millimètres pour calculer la FDTD de la distribution du taux SAR chez les humains exposés aux champs électromagnétiques produits par des émetteurs radio portatifs. Il existe sur le marché des logiciels permettant d'effectuer cette modélisation.

3.2 Mesures SAR

Le taux d'absorption spécifique (SAR) (W/kg) est la grandeur limite de base de la plupart des réglementations et normes d'exposition aux fréquences radio. Le SAR est une mesure du taux d'énergie électromagnétique dissipée par unité de masse de tissu: puissance absorbée par unité de masse.

Le taux SAR peut être défini comme étant la valeur normalisée sur l'ensemble de la masse corporelle (parfois appelée «taux SAR moyenné corps entier») ou la valeur localisée sur un petit volume de tissu (taux SAR localisé).

Le taux SAR peut être déterminé à partir des grandeurs internes de trois façons, comme l'indique l'équation suivante:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} = C_i \frac{dT}{dt} = \frac{J^2}{\sigma \rho} \quad (25)$$

où:

E : champ électrique interne dans les tissus biologiques (V/m⁻¹)

σ : conductivité des tissus biologiques (S/m⁻¹)

ρ : densité des tissus biologiques (kg/m⁻³)

C_i : capacité thermique des tissus biologiques (J/kg⁻¹ °C⁻¹)

dT/dt : dérivée temporelle de la température dans les tissus biologiques (°C/s⁻¹)

J : densité de courant induit dans les tissus biologiques (A/m²).

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

$$SAR = d/d_t \quad dW/dm \quad (26)$$

Cette valeur de grandeur est importante de deux points de vue: la distribution non uniforme résultante de l'absorption d'énergie en cas d'exposition à une onde plane uniforme et l'absorption d'énergie localisée résultant de champs non uniformes à proximité immédiate d'une source d'exposition.

Les règlements ou normes d'exposition contiennent des limites dérivées des champs électriques et magnétiques. Le concept de dosimétrie sous-jacent garantit que le respect des niveaux dérivés (externes) garantira le respect des limites de base du taux SAR. Toutefois, des mesures du SAR externes ou internes peuvent également être utilisées pour démontrer la conformité. Dans des conditions d'exposition partielle du corps en champ proche, les champs EMF externes peuvent être difficiles à mesurer, voire dépasser les limites dérivées, bien que le taux SAR local soit inférieur aux limites de base. Dans ces cas, des mesures du taux SAR interne dans des modèles corporels doivent être effectuées. Les méthodes les plus importantes pour mesurer le taux SAR seront décrites ci-dessous.

3.2.1 Mesure du champ électrique

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

$$SAR = \sigma E^2 / \rho \quad (27)$$

où:

σ (S/m): conductivité

ρ (kg/m³): densité massique du tissu à l'emplacement considéré.

À l'aide d'une sonde isotrope du champ électrique, on peut déterminer le taux SAR local à l'intérieur d'un modèle corporel irradié. En déplaçant la sonde et en répétant les mesures du champ électrique dans tout ou partie du corps, on peut déterminer la distribution du taux SAR et les valeurs moyennes du taux SAR du corps entier ou d'une partie du corps. Une seule mesure de champ électrique ne prend que quelques secondes, ce qui signifie que les distributions tridimensionnelles du taux SAR peuvent être déterminées avec une résolution spatiale élevée et avec un temps de mesure raisonnable (généralement moins d'une heure).

3.2.2 Mesure de la température

Le taux SAR est proportionnel au taux initial d'augmentation de la température dT/dt (K/s) dans les tissus d'un objet exposé:

$$SAR = c \Delta T / \Delta t \quad (28)$$

où c est la capacité thermique spécifique du tissu (J kg⁻¹ K⁻¹). À l'aide de certaines sondes de température, on peut déterminer le taux SAR local à l'intérieur d'un modèle corporel irradié. Une ou plusieurs sondes sont utilisées pour déterminer l'élévation de température ΔT pendant une courte durée d'exposition Δt (généralement moins de 30 s pour éviter le transfert de chaleur). Le taux initial d'augmentation de la température est approximé par $\Delta T / \Delta t$, et la valeur du taux SAR local est calculée pour chaque position de mesure. En répétant les mesures de température dans le corps entier ou dans une partie du corps, on peut déterminer la distribution du taux SAR et les valeurs moyennes du taux SAR du corps entier ou d'une partie du corps.

Les mesures tridimensionnelles de la distribution du taux SAR prennent beaucoup de temps en raison du grand nombre de points de mesure. Pour obtenir un temps de mesure raisonnable, le nombre de points doit être limité. Cela signifie qu'il est difficile de mesurer avec précision des distributions fortement non uniformes du taux SAR. La précision des mesures de température peut également être affectée par la conduction thermique et la convection pendant les mesures ou entre les mesures.

3.2.3 Mesure calorimétrique

Le taux SAR moyen dans tout le corps peut être déterminé à l'aide de méthodes calorimétriques. Dans une mesure calorimétrique normale, un modèle corporel grandeur nature ou à l'échelle à l'équilibre thermique est irradié pendant un certain temps. Un calorimètre est ensuite utilisé pour mesurer le flux de chaleur du corps, jusqu'à ce que le modèle soit à nouveau à l'équilibre thermique. L'énergie absorbée totale obtenue est ensuite divisée par le temps d'exposition et la masse du modèle corporel, ce qui donne le taux SAR de tout le corps. La technique des puits jumeaux calorimétriques utilise deux calorimètres et deux modèles corporels identiques. L'un des modèles est irradié et l'autre est utilisé comme référence thermique. Cela signifie que la mesure peut être effectuée dans des conditions thermiques moins bien contrôlées qu'une mesure calorimétrique normale.

Les mesures calorimétriques donnent des déterminations assez précises du taux SAR du corps entier, mais ne donnent aucune information sur la distribution interne du taux SAR. Pour obtenir des résultats précis, une quantité suffisante de dépôt d'énergie est nécessaire. La durée totale d'une mesure, qui est déterminée par le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique après exposition, peut atteindre plusieurs heures. Le taux SAR du corps partiel peut être mesuré à l'aide de fantômes à corps partiel et de petits calorimètres.

4 Mesure du courant corporel

Les appareils de mesure du courant corporel peuvent être classés en deux catégories:

- dispositifs de mesure du courant corps-sol;
- dispositifs de mesure du courant de contact.

4.1 Courant corporels induits

Les courants corporels internes qui sont induits chez les personnes résultent d'une exposition partielle ou totale du corps aux champs RF en l'absence de contact avec des objets autres que le sol.

Les deux principales techniques utilisées pour mesurer les courants corporels comprennent les transformateurs de courant (solénoïdaux) à pince pour mesurer le courant circulant dans les membres et les systèmes de plaques parallèles qui permettent de mesurer les courants circulant à la terre par les pieds.

Des transformateurs de courant à pince ont été mis au point et peuvent être portés.

Le mesureur est monté soit directement sur le transformateur, soit connecté par une liaison à fibres optiques pour afficher le courant circulant dans un membre autour duquel le transformateur de courant est fixé. La détection du courant dans ces unités peut être réalisée soit par des techniques à bande étroite, par exemple des analyseurs de spectre ou des récepteurs syntonisés (qui offrent l'avantage de pouvoir déterminer la distribution de fréquence du courant induit dans des environnements multi-sources, soit par des techniques large bande utilisant la détection par diodes ou la conversion thermique).

Les instruments ont été conçus pour fournir de véritables indications des valeurs efficaces en présence de fréquences multiples et/ou de formes d'ondes modulées en amplitude.

La réponse en haute fréquence des transformateurs de courant est habituellement limitée à environ 100 MHz; toutefois, on a utilisé des transformateurs à noyau d'air (par opposition aux transformateurs à noyau de ferrite) pour prolonger la réponse en haute fréquence de ces instruments. Les transformateurs à noyau d'air sont plus légers et donc utiles pour des mesures à plus long terme, mais ils sont nettement moins sensibles que les dispositifs à noyau de ferrite.

Une alternative au dispositif à pince est le système à plaques parallèles. Dans cet instrument, le courant corporel circule à travers les pieds jusqu'à une plaque supérieure conductrice, à travers une forme de capteur de courant monté entre les plaques, et donc à la terre. On peut déterminer le courant circulant entre les plaques supérieure et inférieure en mesurant la chute de tension RF aux bornes d'une résistance de 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 entre les deux plaques.

Il existe des appareils à réponse de fréquence en palier entre 3 kHz et 100 MHz.

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

Tout d'abord, les appareils de mesure sont soumis à l'influence des courants de déplacement induits par le champ électrique provenant des champs se terminant sur la plaque supérieure. Des recherches ont montré que les erreurs apparentes survenant en l'absence d'une personne n'affectent pas le fonctionnement des compteurs lorsqu'une personne est présente.

Deuxièmement, la somme des courants des deux chevilles mesurés avec des appareils de mesure à pinces tend à être légèrement supérieure à la valeur correspondante indiquée avec des appareils de mesure à plaques. L'ampleur de cet effet, qui est fonction de la fréquence RF et de la géométrie du mesureur, n'est vraisemblablement pas importante. Néanmoins, la méthode la plus précise d'évaluation des courants des membres est le transformateur de courant. La méthode de mesure précise peut dépendre des prescriptions des lignes directrices en matière de protection par rapport auxquelles les évaluations de conformité sont effectuées.

Troisièmement, il faut envisager la possibilité de mesurer les courants induits dans les membres dans des conditions réalistes de mise à la terre telles qu'elles sont rencontrées dans la pratique. En particulier, le degré différent de contact électrique entre le sol et la plaque inférieure du système de plaques parallèles et la surface réelle du sol peut affecter le courant apparent qui circule à la terre.

Les mesures peuvent être faites à l'aide d'antennes conçues pour être équivalentes à une personne. Cela permet d'utiliser une approche normalisée et d'effectuer des mesures de courant sans qu'il soit nécessaire d'exposer les personnes à des courants et à des champs potentiellement dangereux.

4.2 Mesure du courant de contact

L'appareil de mesure du courant doit être inséré entre la main de la personne et l'objet conducteur. La technique de mesure peut consister en une sonde métallique (zone de contact définie) que l'on tiendra à la main à une extrémité de la sonde, l'autre extrémité étant en contact avec l'objet conducteur. Un détecteur de courant à pince (transformateur de courant) peut être utilisé pour mesurer le courant de contact qui circule dans la main en contact avec l'objet conducteur.

D'autres méthodes sont les suivantes:

- la mesure de la différence de potentiel (chute de tension) aux bornes d'une résistance non inductive (gamme de résistance de 5 à 10 Ω) connectée en série entre l'objet et la sonde métallique tenue dans la main;
- un milliampèremètre thermocouple placé directement en série.

Les connexions de câblage et le mesureur de courant doivent être réglés de manière à réduire au minimum les interférences et les erreurs dues au captage.

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

4.3 Mesure de la tension au contact

La tension au contact (tension à vide) est mesurée au moyen d'un voltmètre ou d'un oscilloscope adaptés 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 un potentiel de référence (terre). L'impédance d'entrée du voltmètre ne doit pas être inférieure à 10 k Ω .

Pièce jointe 6 à l'Annexe 1

Dispositifs électromédicaux implantés et portables

1 Dispositifs électromédicaux

La compatibilité électromagnétique (CEM) est une préoccupation générale pour les équipements électroniques et en particulier pour les dispositifs médicaux électroniques. Si des dispositifs électromédicaux sont utilisés en présence de stations de radiodiffusion de Terre puissantes, ils peuvent mal fonctionner. Le risque d'un tel dysfonctionnement augmente si les valeurs du champ sont suffisamment grandes. Le risque de mauvais fonctionnement dépend de plusieurs variables, telles que le niveau du champ, qui dépend de la distance entre l'antenne d'émission et le dispositif, la puissance de l'émetteur, la fréquence d'émission, le type de modulation du signal rayonné, l'effet de couplage du câble ainsi que l'immunité RF propre au dispositif électronique.

Il peut être possible de réduire, ou d'éliminer, les brouillages RF causés aux dispositifs électromédicaux par un filtrage RF ou un filtrage électronique approprié. Les techniques appliquées dérivées de celles couramment utilisées pour la CEM sont appropriées. Des limites spéciales, qui peuvent être nettement inférieures aux limites pour la population générale, peuvent s'appliquer aux dispositifs médicaux, implantés ou non, et aux instruments médicaux.

2 Dispositifs implantés et portables

Les champs électromagnétiques peuvent causer des brouillages RF aux dispositifs médicaux implantés ou portables actifs. Les pompes à insuline et les stimulateurs cardiaques appartiennent à cette catégorie et le nombre de ces dispositifs peut augmenter. En outre, la gamme et le nombre de dispositifs différents semblent augmenter, par exemple moniteurs portatifs, prothèses oculaires et émouvantes. D'une manière générale, les stimulateurs cardiaques et autres dispositifs médicaux peuvent subir des brouillages dus aux champs électromagnétiques émis. Toutefois, dans le cas des dispositifs électromédicaux implantés, les problèmes de brouillage RF n'ont pas encore été complètement résolus.

Pièce jointe 7 de l'Annexe 1

Références supplémentaires

- [1] [ICNIRP 2020](#), Lignes directrices visant à limiter l'exposition aux champs électromagnétiques (100 kHz à 300 GHz).
 - [2] [ICNIRP 2010](#), Lignes directrices visant à limiter l'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variant dans le temps (1 Hz – 100 kHz).
 - [3] [IEEE C95.1-2019](#), Norme de l'IEEE relative aux niveaux de sécurité pour ce qui est de l'exposition des personnes aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques entre 0 Hz et 300 GHz.
 - [4] Mazar 2016, Radio Spectrum Management: Policies, Regulations and Techniques, [Chapitre 9](#), 2021.
 - [5] CEI 62232, Détermination du champ RF, de la densité de puissance et du SAR au voisinage de stations de base de radiocommunication aux fins d'évaluation de l'exposition des personnes.
 - [6] [OMS \(février 2020\)](#), Rayonnement: réseaux mobiles 5G et santé.
 - [7] [ETSI TR 102 457](#), Systèmes radioélectriques fixes; Évaluation du champ électromagnétique rayonné par des stations radioélectriques fixes en visibilité directe utilisant des antennes directives paraboliques.
 - [8] [EN 50496](#), Détermination de l'exposition des travailleurs aux champs électromagnétiques et évaluation des risques sur un site de diffusion.
 - [9] [EN 50554](#), Norme de base pour l'évaluation in situ de l'exposition aux champs électromagnétiques à fréquence radio à proximité d'un site de radiodiffusion.
-