



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

K.61

(09/2003)

SÉRIE K: PROTECTION CONTRE LES
PERTURBATIONS

**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**

Recommandation UIT-T K.61

Recommandation 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

Résumé

La présente Recommandation a pour objet d'aider les opérateurs de télécommunication à vérifier la conformité de leurs installations aux normes en matière de valeurs limites d'exposition promulguées par des autorités locales ou nationales. Elle contient des directives sur les méthodes de mesure susceptibles d'être utilisées pour évaluer cette conformité. Elle donne également des indications quant au choix de méthodes numériques pertinentes pour la prévision du niveau d'exposition dans diverses situations.

Source

La Recommandation K.61 de l'UIT-T a été approuvée par la Commission d'études 5 (2001-2004) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8 le 6 septembre 2003.

Mots clés

Exposition aux ondes RF, sécurité vis-à-vis des ondes RF.

AVANT-PROPOS

L'UIT (Union internationale des télécommunications) est une institution spécialisée des Nations Unies dans le domaine des télécommunications. L'UIT-T (Secteur de la normalisation des télécommunications) est un organe permanent de l'UIT. Il est chargé de l'étude des questions techniques, d'exploitation et de tarification, et émet à ce sujet des Recommandations en vue de la normalisation des télécommunications à l'échelle mondiale.

L'Assemblée mondiale de normalisation des télécommunications (AMNT), qui se réunit tous les quatre ans, détermine les thèmes d'étude à traiter par les Commissions d'études de l'UIT-T, lesquelles élaborent en retour des Recommandations sur ces thèmes.

L'approbation des Recommandations par les Membres de l'UIT-T s'effectue selon la procédure définie dans la Résolution 1 de l'AMNT.

Dans certains secteurs des technologies de l'information qui correspondent à la sphère de compétence de l'UIT-T, les normes nécessaires se préparent en collaboration avec l'ISO et la CEI.

NOTE

Dans la présente Recommandation, l'expression "Administration" est utilisée pour désigner de façon abrégée aussi bien une administration de télécommunications qu'une exploitation reconnue.

Le respect de cette Recommandation se fait à titre volontaire. Cependant, il se peut que la Recommandation contienne certaines dispositions obligatoires (pour assurer, par exemple, l'interopérabilité et l'applicabilité) et considère que la Recommandation est respectée lorsque toutes ces dispositions sont observées. Le futur d'obligation et les autres moyens d'expression de l'obligation comme le verbe "devoir" ainsi que leurs formes négatives servent à énoncer des prescriptions. L'utilisation de ces formes ne signifie pas qu'il est obligatoire de respecter la Recommandation.

DROITS DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un Membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

A la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT n'avait pas été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle protégée par des brevets à acquérir pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux responsables de la mise en œuvre de consulter la base de données des brevets du TSB.

© UIT 2004

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.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1	Domaine d'application 1
2	Références normatives..... 1
3	Termes et définitions 1
4	Abréviations et acronymes 3
5	Principes généraux..... 3
5.1	Grandeurs mesurées..... 4
5.2	Situations types..... 4
6	Considérations techniques 5
6.1	Calcul de la moyenne 5
6.2	Grandeurs considérées..... 5
6.3	Régions de champ..... 5
6.4	Effet d'écran et diffusion 7
6.5	Variabilité de la source..... 7
7	Mesures..... 8
7.1	Instrumentation de mesure 8
7.2	Evaluation des incertitudes de mesure 11
7.3	Choix de la sonde 11
7.4	Procédures 12
7.5	Précautions en matière de sécurité 12
7.6	Régions de champ..... 12
7.7	Sources multiples..... 13
7.8	Variabilité temporelle et variabilité spatiale..... 13
8	Examen de la conformité aux limites: traitement des résultats de mesure 13
8.1	Identification de sources distinctes..... 13
8.2	Sources intermittentes 14
8.3	Stations de base des systèmes mobiles radiofréquences 14
Appendice I – Méthodes de calcul..... 15	
I.1	Généralités..... 15
I.2	Description des méthodes..... 16
I.3	Autres modèles de champ proche..... 17
I.4	Problèmes pratiques..... 17

Introduction

L'objet de la présente Recommandation est d'aider les opérateurs de télécommunication à vérifier la conformité de leurs installations aux normes en matière de valeurs limites d'exposition promulguées par des autorités locales ou nationales. La Rec. UIT-T K.52, *Directives concernant les valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques*, donne des indications sur la nécessité de procéder à l'évaluation du niveau d'exposition aux rayonnements produits par une installation de télécommunication. Cette évaluation est fondée sur l'estimation du champ électromagnétique et sur des considérations d'accessibilité. L'évaluation du champ électromagnétique peut se faire par des mesures ou des prédictions numériques.

La présente Recommandation définit les outils, les méthodes et les procédures utilisables pour évaluer la conformité. L'évaluation de la conformité aux normes d'exposition aux ondes RF peut se faire grâce à la mesure de l'intensité du champ électromagnétique, à condition d'utiliser des instruments d'étalonnage et que l'incertitude de mesure soit correctement exprimée.

Recommandation 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

1 Domaine d'application

La présente Recommandation porte sur les mesures utilisées pour évaluer l'intensité du champ électromagnétique radiofréquence en vue de vérifier le non-dépassement des limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques produits par des installations de télécommunication fonctionnant entre 9 kHz et 300 GHz. Elle contient également des directives sur les méthodes numériques qui peuvent être utilisées pour évaluer la conformité aux normes d'exposition.

L'exposition à des courants de contact dus à des objets conducteurs irradiés par un champ électromagnétique n'est pas traité dans la présente Recommandation.

Celle-ci ne traite pas non plus de l'exposition due à l'utilisation à proximité immédiate du corps humain de combinés mobiles ou d'autres dispositifs rayonnants. Enfin, l'exposition due à l'utilisation de systèmes téléphoniques sans fil et de terminaux fixes destinés à être utilisés dans des réseaux de télécommunication hertziens (réseaux DECT, WLAN ou Bluetooth, par exemple) n'est pas étudiée dans la présente Recommandation.

2 Références normatives

La présente Recommandation se réfère à certaines dispositions des Recommandations UIT-T et textes suivants, qui de ce fait, en sont partie intégrante. Les versions indiquées étaient en vigueur au moment de la publication de la présente Recommandation. Toute Recommandation ou tout texte étant sujet à révision, les utilisateurs de la présente Recommandation sont invités à se reporter, si possible, aux versions les plus récentes des références normatives suivantes. La liste des Recommandations de l'UIT-T en vigueur est régulièrement publiée. La référence à un document figurant dans la présente Recommandation ne donne pas à ce document, en tant que tel, le statut d'une Recommandation.

- [1] Recommandation UIT-T K.52 (2000), *Directives concernant les valeurs limites d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques.*
- [2] CEI 61566:1997, *Mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques à radiofréquence – Intensité du champ dans la gamme de fréquences entre 100 kHz et 1 GHz.*
- [3] CEI 60657:1979, *Dangers des rayonnements non ionisants dans la gamme de fréquences de 10 MHz à 300 000 MHz.*
- [4] ISO/CEI:1995, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (Guide sur l'expression de l'incertitude de mesure).

3 Termes et définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1 région de champ lointain: région du champ d'une antenne dans laquelle la distribution angulaire du champ est essentiellement indépendante de la distance par rapport à l'antenne. Région dans laquelle le champ présente essentiellement la forme d'une onde plane, c'est-à-dire que les champs électriques et magnétiques sont uniformément répartis localement selon des plans perpendiculaires au sens de propagation.

3.2 région de champ proche: région située à proximité d'une antenne ou d'une autre structure rayonnante, dans laquelle les champs électriques et magnétiques ne présentent pas essentiellement la forme d'une onde plane mais varient considérablement d'un point à un autre. On distingue en outre deux régions de champ proche: la région de champ proche réactif, la plus rapprochée de la structure rayonnante et contenant l'essentiel ou la quasi-totalité de l'énergie stockée, et la région de champ proche rayonnant, dont le champ de rayonnement prédomine sur le champ réactif, mais ne présente pas essentiellement la forme d'une onde plane et est d'une structure complexe.

NOTE – On considère pour un grand nombre d'antennes que la limite extérieure du champ proche réactif se trouve à une distance d'une longueur d'onde de la surface de l'antenne.

3.3 radiofréquence (RF): relatif à toute fréquence associée à un rayonnement électromagnétique utile pour les télécommunications.

NOTE – Dans la présente Recommandation, le terme radiofréquence fait référence à la gamme de fréquences 9 kHz-300 GHz attribuée par le Règlement des radiocommunications de l'UIT-R.

3.4 absorption spécifique (SA, *specific absorption*): quotient de l'énergie incrémentielle (dW) absorbée par (dissipée dans) une masse incrémentielle (dm) contenue dans un élément de volume (dV) d'une densité donnée (ρ_m).

$$SA = \frac{dW}{dm} = \frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV}$$

L'absorption spécifique est exprimée en joules par kilogramme (J/kg).

3.5 taux d'absorption spécifique (SAR, *specific absorption rate*): dérivée temporelle de l'énergie incrémentielle (dW) absorbée par (dissipée dans) une masse incrémentielle (dm) contenue dans un élément de volume (dV) d'une densité de masse donnée (ρ_m).

$$SAR = \frac{d}{dt} \frac{dW}{dm} = \frac{d}{dr} \left(\frac{1}{\rho_m} \frac{dW}{dV} \right)$$

Le taux SAR est exprimé en watts par kilogramme (W/kg).

On peut le calculer selon les formules suivantes:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho_m}$$

$$SAR = c \frac{dT}{dt}$$

$$SAR = \frac{J^2}{\rho_m \sigma}$$

dans lesquelles:

E est la valeur de l'intensité du champ électrique dans les tissus corporels, exprimée en V/m

σ est la conductivité des tissus corporels, exprimée en S/m

ρ_m est la densité des tissus corporels, exprimée en kg/m³

c est la capacité thermique des tissus corporels, exprimée en J/kg°C

$\frac{dT}{dt}$ est la dérivée temporelle de la température dans les tissus corporels, exprimée en °C/s

J est la valeur de la densité du courant induit dans les tissus corporels, exprimée en A/m²

3.6 longueur d'onde (λ): la longueur d'onde d'une onde électromagnétique est le rapport de sa vitesse (v) à sa fréquence (f); elle est exprimée par la formule suivante:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

En espace libre, la vitesse d'une onde électromagnétique est égale à celle de la lumière (c), soit approximativement 3×10^8 m/s.

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

AF	facteur d'antenne (<i>antenna factor</i>)
APC	commande automatique de puissance (<i>automatic power control</i>)
BCCH	canal de commande de la station de base (<i>base station control channel</i>)
CF	facteur d'étalonnage (<i>calibration factor</i>)
CIPR-NI	Commission internationale de protection contre les rayonnements non ionisants
DTX	transmission discontinue (<i>discontinuous transmission</i>)
EM	électromagnétique
EMC	compatibilité électromagnétique (<i>electromagnetic compatibility</i>)
EMF	champ électromagnétique (<i>electromagnetic field</i>)
p.i.r.e.	puissance isotrope rayonnée équivalente
PC	ordinateur personnel (<i>personal computer</i>)
RF	radiofréquence
RMS	écart quadratique moyen (<i>root mean square</i>)
SA	absorption spécifique (<i>specific absorption</i>)
SAR	taux d'absorption spécifique (<i>specific absorption rate</i>)
UMTS	système universel de télécommunication mobile (<i>universal mobile telecommunication system</i>)

5 Principes généraux

La Rec. UIT-T K.52 indique une procédure visant à assurer la mise en conformité des installations aux limites de sécurité pour les champs EMF. Les étapes de cette procédure sont les suivantes:

- 1) identifier les limites à respecter pour assurer la mise en conformité;
- 2) déterminer s'il y a eu lieu de procéder à une évaluation des risques d'exposition de personnes à des champs EMF, pour les installations ou les équipements en question;
- 3) dans l'affirmative, cette évaluation pourra être effectuée par des calculs ou des mesures;
- 4) s'il ressort de l'évaluation que les limites en question risquent d'être dépassées dans des zones où des personnes peuvent se trouver, il convient de prendre des mesures pour réduire ou éviter les champs EMF.

La présente Recommandation contient des directives relatives à la mesure et au calcul des champs EMF (étape 3), qui complètent celles indiquées dans la Rec. UIT-T K.52. Ces méthodes

plus élaborées de prévision d'exposition aux champs sont nécessaires pour affiner les limites de zone obtenues à partir de la Rec. UIT-T K.52 ou pour trouver une solution à une situation complexe pour laquelle l'application des méthodes préconisées dans cette dernière Recommandation risquent d'être insuffisante. Il peut par exemple être utile d'affiner les résultats de la Rec. UIT-T K.52 lorsque ceux-ci indiquent de façon marginale l'occurrence d'une zone de dépassement ou d'une zone d'exposition au travail. Une mesure ou un calcul plus précis peut contribuer à préciser si la détermination de zone est correcte ou si elle correspond à un artefact résultant de l'application de méthodes prudentes préconisées dans la Rec. UIT-T K.52. Les environnements à diffusion complexe ou ceux qui comportent un certain nombre de sources importantes de rayonnements électromagnétiques sont également des exemples pour lesquels la mise en œuvre de mesures peut être nécessaire.

5.1 Grandeurs mesurées

Dans la plupart des documents, les limites assurant la sécurité sont indiquées en termes de niveaux de base et de niveaux de référence (ou dérivés). Les limites de base se rapportent aux grandeurs fondamentales qui déterminent la réaction physiologique du corps humain aux champs EMF. Elles s'appliquent à une situation dans laquelle le corps humain se trouve dans le champ. Les limites de base applicables à l'exposition des personnes sont exprimées par le taux d'absorption spécifique (*SAR*), l'absorption spécifique (*SA*) et la densité de courant.

Etant donné que les valeurs de base sont difficiles à mesurer directement, la plupart des documents indiquent pour le champ électrique, le champ magnétique et la densité de puissance des niveaux dérivés (de référence). Les limites dérivées s'appliquent à une situation dans laquelle le champ électromagnétique n'est pas sensible à la présence d'un corps humain. La partie normative de la présente Recommandation contient des directives de mesure des grandeurs de champ (niveaux de référence).

Les niveaux de référence peuvent être dépassés s'il peut être démontré que le type d'exposition produit un taux d'absorption spécifique, une absorption spécifique et une densité de courant induit inférieurs aux limites de base. L'Appendice I contient donc des directives concernant le choix de procédures qui peuvent être utilisées pour calculer le taux d'absorption spécifique.

5.2 Situations types

On rencontre généralement des problèmes de mesure dans un cas s'apparentant à l'une des situations suivantes:

- 1) on connaît la source de champ EMF ou au moins certaines de ses caractéristiques. Les champs EMF émis par d'autres sources sont négligeables pour l'examen de la conformité aux limites de sécurité. L'objectif est de déterminer les zones de conformité aux normes pour cette source connue;
- 2) les sources de champ EMF sont inconnues. L'objectif est de déterminer la conformité aux normes dans une zone particulière ou d'étudier les champs électromagnétiques dans la région des émissions hors-bande en vue de confirmer que d'autres sources de rayonnements électromagnétiques peuvent être négligées;
- 3) l'objectif est de déterminer la conformité aux normes dans une zone particulière, et, en cas de non-conformité, d'établir la contribution relative des différentes sources à ce dépassement.

Dans le cas 1), la bande des fréquences d'émission devrait être connue avec précision, alors que la connaissance de la puissance émise, de la polarisation et du diagramme d'antenne peut être approximative. Les mesures peuvent ainsi porter essentiellement sur la gamme de fréquences présentant un intérêt particulier. Il convient d'utiliser la Rec. UIT-T K.52 pour évaluer l'intensité de champ en vue de déterminer l'instrumentation appropriée.

Dans le cas 2), il peut être nécessaire d'étudier l'intégralité du spectre de fréquences. On peut pour cela utiliser une sonde de mesure large bande intégrant diverses fréquences. Le cas 3) correspond à une extension du cas 2). Si la mesure initiale indique une non-conformité, des mesures sélectives en fréquence, utilisant par exemple une antenne et un analyseur de spectre, sont nécessaires.

6 Considérations techniques

6.1 Calcul de la moyenne

6.1.1 Calcul de la moyenne temporelle

Les limites sont généralement exprimées par la moyenne sur une certaine période des écarts quadratiques moyens d'une onde continue. Par exemple, il faut calculer les moyennes des limites (de champ) de référence fixées par la CIPR-NI sur une période quelconque de 6 minutes au-dessous de 10 GHz et sur une période de $68/f^{1,05}$ minutes pour les fréquences supérieures à 10 GHz (f désignant la fréquence). Ainsi, pour des signaux fortement dépendant du temps, un traitement des résultats de mesure (procédure de post-traitement) peut être nécessaire aux fins de comparaison avec les valeurs limites.

6.1.2 Calcul de la moyenne spatiale

Les limites du taux SAR se rattachent généralement à l'une des deux catégories suivantes: celle des limites du taux SAR localisé et celle des limites du taux SAR moyen pour la totalité du corps. L'utilisation des limites de la première catégorie est pertinente dans le cas d'expositions dues à des petits émetteurs situés à proximité du corps (combinés mobiles, par exemple). Les limites du taux SAR moyen pour la totalité du corps forment la base des limites de référence, dont il convient également de calculer la valeur moyenne pour la totalité du corps.

Dans le cas d'installations de télécommunication, les valeurs de champ les plus élevées sont observées à proximité des antennes dans des régions où les champs peuvent varier substantiellement à l'échelle du corps humain. Le calcul de la moyenne spatiale est alors requis pour obtenir un résultat plus précis.

6.2 Grandeurs considérées

Les normes d'exposition se rapportent généralement à des limites de composantes électrique ou magnétique ou à des limites de densité de puissance. Des mesures particulières sont effectuées seulement lorsque cela est nécessaire du fait des propriétés de champ rapportées à une région donnée.

6.3 Régions de champ

Les propriétés des champs EMF doivent être prises en considération lorsqu'on mesure et évalue ces champs. Par exemple:

- la mesure du champ électrique et du champ magnétique peut être nécessaire dans la région du champ proche non rayonnant;
- dans le cas de prédictions numériques, l'application du modèle de champ lointain conduit généralement à surévaluer les valeurs de champ dans les régions de champ proche.

Il est donc important d'être attentif aux limites respectives de chaque région de champ avant d'appliquer une procédure d'évaluation de conformité.

6.3.1 Zone de champ proche réactif

Il s'agit de la partie de la région de champ proche située autour et à proximité immédiate de l'antenne et dans laquelle prédomine le champ réactif. On suppose généralement que cette zone s'étend sur une distance d'une longueur d'onde mesurée depuis l'antenne.

6.3.2 Zone de champ proche réactif-rayonnant

En limite de la zone de champ réactif, on peut définir une zone de transition, dans laquelle le champ rayonnant commence à être important par rapport au champ réactif. La limite supérieure de cette région se trouve à quelques longueurs d'onde (3λ par exemple) de la source électromagnétique.

6.3.3 Zone (de Fresnel) de champ proche rayonnant

Il s'agit de la région comprise entre la zone de champ proche réactif et la zone de champ lointain, dans laquelle prédomine le champ rayonnant. Bien que le rayonnement ne se propage pas comme une onde plane, on peut considérer que les composantes électrique et magnétique sont localement perpendiculaires; de plus, on peut supposer que le rapport E/H est constant (et pratiquement égal à Z_0 , l'impédance intrinsèque en espace libre). Cette région existe uniquement si la dimension maximale D de l'antenne est grande par rapport à la longueur d'onde λ .

6.3.4 Zone de champ lointain rayonnant

Il s'agit de la région dans laquelle la distribution angulaire des champs est pratiquement indépendante de la distance à l'antenne et dans laquelle la densité de puissance rayonnée [W/m^2] est constante. La limite inférieure de cette zone est définie par 3λ ou par $2D^2/\lambda$, si cette dernière valeur est supérieure à la première (ce qui est le cas si la dimension maximale D de l'antenne est grande par rapport à la longueur d'onde λ). Dans la région de champ lointain, les composantes du champ sont transversales et se propagent comme une onde plane.

Les régions de champ décrites ci-dessus sont indiquées sur la Figure 1 (D étant supposé grand par rapport à la longueur d'onde λ).

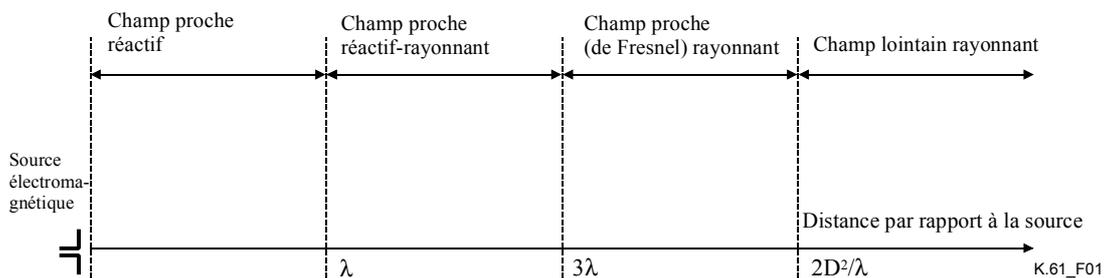


Figure 1/K.61 – Régions de champ autour d'une source électromagnétique (la dimension maximale D de l'antenne est supposée grande par rapport à la longueur d'onde λ)

Tableau 1/K.61 – Propriétés principales du champ électromagnétique dans différentes régions de champ

	Champ proche réactif	Champ proche réactif-rayonnant	Champ proche rayonnant	Champ lointain rayonnant
Limite inférieure	0	λ	3λ	$\text{Max}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$
Limite supérieure	λ	3λ	$\text{Max}(3\lambda; 2D^2/\lambda)$	∞
Densité de puissance S [W/m ²]	$S \leq E H $	$S \leq E H $	$S = E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$	$S = E H $ $= \frac{ E ^2}{Z_0} = Z_0 H ^2$
$E \perp H$	Non	Non	Localement	Oui
$Z = E/H$	$\neq Z_0$	$\neq Z_0$	$\approx Z_0$	$= Z_0$

6.4 Effet d'écran et diffusion

L'intensité du champ EMF varie dans l'espace en raison de l'incidence de la réflexion et de la diffusion sur les structures conductrices adjacentes. L'ampleur de cette variation dépend de la longueur d'onde. Il est important de tenir compte de cette variabilité pour déterminer les emplacements des niveaux maximaux d'exposition et de faire intervenir le calcul de la moyenne spatiale le cas échéant.

Puisque les normes d'exposition spécifient les limites d'exposition applicables au corps humain, il convient d'étudier l'incidence du corps humain sur le diagramme de champ. La Figure 2 illustre à titre d'exemple le cas où, de par sa présence, un corps humain absorbe l'onde incidente et crée une zone d'ombre empêchant l'occurrence d'une réflexion qui, si elle existait, accroîtrait l'intensité du champ à l'emplacement de ce corps. Ce type d'effet, en particulier aux hyperfréquences, peut conduire à surestimer le champ mesuré ou calculé au voisinage d'objets réfléchissants.

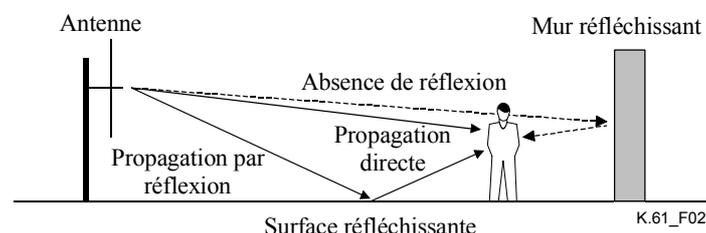


Figure 2/K.61 – Illustration d'une altération de la propagation par trajets multiples, due à une présence humaine

6.5 Variabilité de la source

Les sources de télécommunication présentent parfois des caractéristiques variables dans le temps, ce qui est particulièrement important s'il s'agit de la puissance d'émission ou du diagramme

d'antenne. Cette variabilité pose un problème difficile pour réaliser les mesures puisque l'état exact de l'émetteur au moment des mesures risque de ne pas être connu.

6.5.1 Variabilité du niveau de puissance

L'évaluation des risques d'exposition doit tenir compte de la puissance totale maximale rayonnée par l'émetteur. La puissance émise par un système de télécommunication peut varier suivant le réglage de la commande APC ou le niveau d'utilisation du canal considéré. La commande APC permet de modifier le niveau de la puissance de sortie afin de compenser les pertes dues à des conditions de propagation défavorables. La variabilité du canal se rapporte aux deux points suivants:

- 1) l'attribution dynamique des canaux; ces derniers sont activés ou désactivés à la demande;
- 2) la variation du degré d'occupation des canaux; la quantité de données transmises par un canal donné varie, mais même les porteuses des canaux inoccupés restent activées. La variation du degré d'occupation des canaux a un effet supposé faible cependant, sur la modulation du signal.

6.5.2 Variabilité du diagramme d'antenne

Bien que moins fréquente que l'application d'un niveau de puissance variable, l'utilisation par certains systèmes de télécommunication d'antennes actives capables de modifier dynamiquement leur diagramme de rayonnement est parfois observée.

6.5.3 Sources intermittentes

Certaines sources utilisées en télécommunication se caractérisent par un rayonnement intermittent. Elles n'émettent une énergie RF que si des informations doivent être transmises.

Elles peuvent fonctionner en mode régulier, les données étant alors transmises à intervalles réguliers ou suivant un calendrier prédéfini.

Leur mode de fonctionnement peut aussi être irrégulier, les données n'étant alors transmises qu'en cas d'activation par un opérateur ou lorsqu'une quantité de données suffisante pour activer la transmission a été accumulée.

7 Mesures

7.1 Instrumentation de mesure

7.1.1 Caractéristiques

Les caractéristiques générales suivantes sont importantes pour opérer un choix parmi les dispositifs de mesure.

7.1.1.1 Bande de fréquences

Il peut s'agir d'une bande large ou d'une bande étroite.

- 1) Les dispositifs à large bande (tels que les sondes électriques ou magnétiques couramment utilisées) ne donnent pas d'information sur le spectre de fréquences. Toutefois, il est possible d'effectuer des mesures sélectives en fréquence dans de larges bandes en utilisant de petites antennes à large bande (antennes bicônes, à cornet par exemple ...) ou des dispositifs plus chers et sophistiqués.
- 2) Les dispositifs à bande étroite sont généralement des antennes à facteur d'antenne constant sur des parties limitées du spectre (cas par exemple des antennes à dipôles) et peuvent être utilisés pour effectuer des mesures sélectives en fréquence.

7.1.1.2 Directivité de l'antenne

La réponse de l'antenne peut être isotrope ou directive.

La réponse d'un dispositif isotrope est supposée être indépendante de la direction du champ EMF incident.

La réponse d'un dispositif directif est supposée dépendre de la direction du champ EMF incident. Un tel dispositif est généralement polarisé et présente un diagramme de rayonnement à symétrie axiale. Il est donc nécessaire de faire pivoter le dispositif de mesure pour reconstruire le champ.

7.1.1.3 Grandeur mesurée

La plupart des dispositifs mesurent soit le champ électrique, soit le champ magnétique.

Il est important de distinguer ces deux types de champ dans la zone de champ réactif.

Dans la zone de champ lointain, on peut mesurer le champ électrique ou le champ magnétique puis déterminer la densité de puissance équivalente. Cependant, on préfère généralement utiliser des dispositifs de mesure du champ électrique. La densité de puissance équivalente dans la zone de champ lointain se calcule à partir du champ mesuré, comme l'indique le Tableau 1.

7.1.2 Choix du dispositif

Le choix du dispositif de mesure du champ EMF dépend de certains paramètres, dont:

- la norme existante à respecter (les limites peuvent par exemple dépendre de la fréquence);
- le nombre et les caractéristiques des sources EMF;
- les régions de champ (champ proche réactif, champ proche rayonnant ou champ lointain) dans lesquelles sont faites les mesures.

Le choix de l'équipement de mesure dépend fortement de la procédure de mesure appliquée. La précision des résultats dépend de la procédure choisie ainsi que des caractéristiques des instruments utilisés.

On estime qu'une incertitude de mesure globale inférieure ou égale à 4 dB avec un intervalle de confiance à 95% (c'est-à-dire un intervalle de $\pm 2\sigma$) est suffisante pour pouvoir décider de la conformité aux normes.

Si l'incertitude de mesure est supérieure à 4 dB, les valeurs limites devraient être diminuées d'une valeur égale à la moitié de la différence entre cette incertitude et 4 dB. Le critère de conformité est donc:

$$X_{meas} \leq X_{lim} - \frac{1}{2}(U - 4)$$

où:

U est l'incertitude de mesure;

X_{lim} est la valeur limite;

X_{meas} est la valeur mesurée.

7.1.3 Spécifications liées à l'étalonnage

7.1.3.1 Facteur d'étalonnage

Le facteur d'étalonnage CF d'une sonde à large bande est défini par la formule suivante:

$$CF = \frac{E_{ref}}{E_{meas}}$$

Il s'agit du rapport entre l'intensité du champ électrique de référence supposé (E_{ref}) et la valeur (E_{meas}) affichée sur l'ordinateur utilisé ou sur une unité de réception appropriée. Ce facteur dépend essentiellement de la fréquence et, en présence d'une erreur de non-linéarité, de l'intensité du champ. On détermine CF en fonction de la fréquence. Pour chaque fréquence CF doit être connue avec une incertitude inférieure à 1 dB. Les erreurs dues à l'interpolation en fréquence sont intégrées dans la marge d'incertitude acceptable sur CF.

7.1.3.2 Facteur d'antenne

Le facteur d'antenne (AF, *antenna factor*) est défini pour les antennes et les sondes sélectives en fréquence par le rapport suivant:

$$AF = \frac{E_{ref}}{V} [m^{-1}]$$

où E_{ref} [V/m] est l'intensité du champ électrique de la sonde et V [V] est la tension mesurée par l'analyseur de spectre. Ce facteur est principalement fonction de la fréquence mais peut également, en présence d'erreurs de non-linéarité, dépendre de l'intensité de champ. On détermine AF en fonction de la fréquence. Pour chaque fréquence, AF doit être connue avec une incertitude de mesure globale inférieure ou égale (c'est-à-dire suivant un intervalle de confiance à 95%) à 2 dB. L'incertitude maximale acceptable comprend également, si nécessaire, l'erreur due à l'interpolation en fréquence.

7.1.3.3 Isotropie

Une sonde isotrope est presque toujours utile pour vérifier la conformité d'une installation de télécommunication. On obtient généralement une réponse isotrope grâce à l'utilisation d'un système d'antenne à trois axes deux à deux orthogonaux. L'écart par rapport à la réponse isotrope idéale est mesurée lors d'un essai d'isotropie. Cet écart est appelé erreur d'anisotropie et est généralement fonction de la direction de l'onde incidente. Elle peut être évaluée:

- en mesurant l'écart par rapport à la réponse en cosinus sur chacun des axes, si ces derniers sont clairement identifiés dans l'espace et si un signal est disponible sur chacun d'eux;
- en vérifiant la réponse globale de la sonde, s'il n'est pas possible de définir clairement la position de chaque axe ou s'il n'existe pas de signal sur un des axes.

L'écart moyen par rapport à la réponse isotrope devrait être inférieur à 1 dB.

7.1.3.4 Linéarité

La réponse à l'amplitude de champ doit être linéaire, car une erreur de linéarité signifierait que les facteurs d'antenne et d'étalonnage sont fonction de l'intensité de champ appliquée au cours de l'essai. L'essai de linéarité devrait donc être le point de départ de tout le processus de caractérisation de la sonde. Il consiste à vérifier, sur un intervalle de fréquences dynamique aussi grand que possible, la relation existante entre la puissance rayonnée, d'une part, et le champ électrique ou la tension mesurée, d'autre part. Cette relation est linéaire en unités logarithmiques: la bande d'incertitude sur la régression linéaire doit avoir la même amplitude que l'incertitude de mesure. Si cette condition n'est pas remplie, l'apparition d'une erreur de linéarité est probable et l'on suggère d'appliquer les mesures suivantes:

- concernant le processus de caractérisation: mesurer CF ou AF pour différentes amplitudes de l'onde testée, ce qui conduit à des résultats différents;
- concernant l'évaluation de la conformité: les différences dues à l'intensité de champ peuvent être traitées en élargissant l'incertitude de mesure ou en modifiant la valeur des facteurs suivant l'intensité de champ considérée (lorsque cela est possible).

Vérifier la linéarité de la réponse à certaines fréquences peut être utile. L'écart maximal acceptable par rapport à une réponse linéaire est de 1 dB.

7.1.3.5 Signaux à impulsions

Du fait de leur modulation et en raison de leur accès à plusieurs types de média, les systèmes numériques mobiles radiofréquences émettent des signaux à impulsions. Il est donc nécessaire, lorsque le processus de caractérisation est effectué à l'aide d'un champ d'essai d'onde continue, de vérifier si l'application d'un champ d'essai de signal à impulsions modifie les caractéristiques à l'essai.

Si les différences mesurées, pour CF et AF, entre les valeurs induites par l'utilisation d'un signal à impulsions ou par l'utilisation d'une onde continue sont inférieures aux niveaux d'incertitude applicables, les instruments de mesure peuvent être utilisés indépendamment du type de signal mesuré.

7.1.3.6 Sommation de plusieurs signaux

Vérifier la sommation correcte de signaux différents correspondant à diverses fréquences constitue un test important des sondes à large bande non sélectives en fréquence. Il s'agit de s'assurer que le résultat de la mesure est bien donné par la formule des écarts quadratiques moyens suivante:

$$E_{rms} = \sqrt{\sum_i E_i^2}$$

Cet essai peut facilement être effectué avec deux sources radiofréquences: son résultat doit vérifier la condition:

$$20 \log_{10} \left\{ \frac{E_{mes} - \sqrt{E_1^2 + E_2^2}}{E_{mes}} \right\} < 0,5 \text{ dB}$$

où:

E_{mes} est le champ électrique mesuré;

E_1 et E_2 sont les valeurs réelles des champs.

Où la condition: être inférieure à l'incertitude de mesure sur le champ électrique ou la tension.

7.1.3.7 Rejet d'une composante axiale

On mesure lors de l'essai la réponse d'un axe illuminé par une onde incidente à polarisation croisée. Le rejet d'une composante axiale présentant un niveau de réponse peu élevé pourrait avoir des effets importants sur la mesure de l'intensité du champ électrique si celui-ci est calculé comme étant égal à l'écart quadratique moyen des trois composantes axiales.

7.2 Evaluation des incertitudes de mesure

Les incertitudes de mesure des champs résultent d'erreurs dues à l'instrumentation du système, à la réponse et à l'étalonnage de la sonde de mesure du champ ainsi qu'aux algorithmes d'extrapolation, d'interpolation et d'intégration utilisés pour déterminer le champ moyen. Il convient de se reporter au guide ISO/CEI [4] pour obtenir des précisions sur l'évaluation des incertitudes et leur expression.

7.3 Choix de la sonde

7.3.1 Dimension de la sonde

Pour des mesures dans la zone de champ proche, la dimension du capteur de la sonde devrait être inférieure à une longueur d'onde à la fréquence d'exploitation la plus élevée.

7.3.2 Bande de fréquences

D'une manière générale, il convient d'utiliser aussi souvent que possible une sonde à large bande (pour des raisons de simplicité et de rapidité), bien qu'une mesure sélective en fréquence soit fréquemment nécessaire (c'est-à-dire en général lorsqu'il n'est pas possible d'identifier une source principale ou lorsque les résultats de mesure doivent être traités pour être comparés à une limite d'écart quadratique moyen).

Il est généralement nécessaire de procéder à une mesure sélective en fréquence:

- dans le cas de plusieurs sources caractérisées par des limites différentes;
- dans le cas de plusieurs sources pour lesquelles des techniques de mesure différentes sont préconisées (post-traitement pour le réseau GSM par exemple);
- pour déterminer les contributions relatives de plusieurs sources.

7.3.3 Directivité

L'utilisation d'une sonde non directive est préférable.

7.4 Procédures

Avant de mesurer un champ EMF potentiellement dangereux, il convient d'appliquer la procédure d'évaluation approximative décrite dans la Rec. UIT-T K.52. On pourra ainsi évaluer l'intensité supposée du champ et les limites de la zone de conformité, ce qui permettra de mieux choisir les instruments et les procédures d'essai appropriées.

7.5 Précautions en matière de sécurité

Le personnel devrait observer des règles de sécurité appropriées lors des mesures. En cas de mesures dans la zone de dépassement, il convient de se conformer aux règles de précaution spécifiées dans la Rec. UIT-T K.52. Des précautions contre des effets indirects tels que les courants de contact devraient également être prises.

7.6 Régions de champ

La composante électromagnétique à mesurer (E ou H) dépend de la zone considérée (celle d'un champ réactif ou rayonnant) et de l'impédance du champ. Il convient ainsi d'observer les directives suivantes:

- dans la zone de champ proche réactif: mesure des composantes E et H ou évaluation du taux SAR;
- dans la zone de champ proche réactif-rayonnant: si aucune information sur l'impédance du champ n'est disponible, mesure des composantes E et H; si on dispose de données sur l'impédance du champ, il est possible de ne mesurer qu'une composante du champ à condition d'observer les hypothèses prudentes suivantes:

Mesure de la seule composante E si $\frac{E}{H} > Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ (cas d'une impédance de champ EMF élevée)

Mesure de la seule composante H si $\frac{E}{H} < Z_0 = 120 \times \pi [\Omega]$ (cas d'une impédance de champ EMF faible)

- dans la zone de champ proche rayonnant: mesure de la seule composante E, l'hypothèse faite étant celle d'une impédance en espace libre (Z_0) (ce qui induit des différences petites par rapport aux incertitudes de mesure);
- dans la zone de champ lointain rayonnant: mesure de la seule composante E.

Lorsque les lieux d'exposition sont très proches de la source de rayonnement, la détermination du taux SAR peut être préférable à la mesure du champ.

7.7 Sources multiples

L'effet de plusieurs sources fonctionnant à des fréquences différentes doit être étudié conformément aux prescriptions de la commission CIPR-NI ou à la norme applicable en matière d'exposition RF. On utilise généralement pour cette estimation une somme pondérée des contributions des diverses sources, la pondération de chaque source étant proportionnelle à la limite applicable à sa fréquence de fonctionnement.

7.8 Variabilité temporelle et variabilité spatiale

Les réflexions multitrajets peuvent générer une distribution de champ non uniforme. Une série de mesures devraient être effectuées dans un cube de deux mètres d'arrête. Pour les mesures faites à proximité d'un objet métallique, le bord de la sonde devrait se trouver à au moins "trois longueurs de sonde" de l'objet considéré. S'il existe plusieurs sources, la zone de mesure devrait être subdivisée à l'aide d'une grille dont les lignes horizontales et verticales sont distantes d'un mètre, les mesures étant faites en chaque point de la grille. Des gradients de champ importants peuvent exister dans la zone de champ proche d'un élément rayonnant. La résolution spatiale des mesures devrait être suffisamment petite pour pouvoir déterminer avec précision les limites de la zone de conformité.

Lorsqu'on suppose une variabilité temporelle de la source, il peut être nécessaire d'effectuer des mesures sur une plus grande période. Par exemple, en cas de variation temporelle dans un canal, les mesures devraient être faites durant une période d'utilisation crête.

7.8.1 Moyenne temporelle et moyenne spatiale

Les mesures initiales faites sur une grille ou à proximité de l'élément rayonnant (voir le § 7.8) correspondent aux valeurs maximales ponctuelles du champ. Il s'agit là de l'évaluation des niveaux d'exposition dans le cas le plus défavorable. Il est possible de définir des zones de conformité fondées sur ces valeurs, correspondant donc à des hypothèses prudentes. Pour une estimation plus fine, on appliquera le calcul de la moyenne spatiale décrit au § 6.1.2.

8 Examen de la conformité aux limites: traitement des résultats de mesure

8.1 Identification de sources distinctes

La sonde utilisée pour la mesure extérieure du champ aux fins d'examen de la conformité aux limites devrait en principe être isotrope, non directive et non polarisée. De plus, elle ne devrait pas induire une propagation importante par diffusion du champ électromagnétique incident et il ne devrait pas avoir d'interaction significative entre les fils qui la relie au compteur et le champ étudié. Toutefois, ce type de sonde ne peut pas établir de distinction entre des sources distinctes.

Des mesures sélectives en fréquence ou directionnelles sont nécessaires pour identifier la contribution de chaque source. Par exemple, l'association d'une antenne et d'un analyseur de spectre permet une mesure plus précise de la fréquence, de la direction et de la polarisation d'une composante du champ. Cela complique toutefois le processus de mesure puisqu'il faut mesurer et sommer les trois polarisations séparément. Par ailleurs, dans un environnement de diffusion complexe, il peut être nécessaire de mesurer le champ suivant plusieurs directions. Il est également possible d'associer l'antenne et l'analyseur de spectre pour vérifier la fréquence et l'origine des émissions mesurées par la sonde isotrope.

8.2 Sources intermittentes

Une sonde isotrope à large bande ou un analyseur de spectre sont l'un comme l'autre incapables de mesurer la durée des rayonnements émis par une source intermittente. La première mesure en effet la valeur maximale (crête) du champ tandis que le second indique la valeur maximale de la densité spectrale dans le domaine des fréquences. Pour calculer correctement la moyenne temporelle, il faut déterminer la durée d'une émission intermittente à partir des spécifications opérationnelles de la source.

8.3 Stations de base des systèmes mobiles radiofréquences

Pour appliquer la méthode préférée de mesure du champ EMF RF produit par des émetteurs de station de base assurant des services de télécommunications hertziennes mobiles, il faut s'assurer que tous les canaux radiofréquences sont occupés au cours de la mesure. Cette vérification peut se faire si l'on connaît le fonctionnement du système ou grâce à l'examen du signal au moyen d'une antenne associée à un analyseur de spectre. Si on ne peut pas effectuer des mesures, tous les canaux étant occupés, il convient d'appliquer une procédure d'extrapolation telle que celle donnée en exemple au § 8.3.1.

8.3.1 Exemple de procédure d'extrapolation

On trouvera dans le présent paragraphe un exemple de procédure d'extrapolation applicable au cas d'un système hertzien mobile à canaux. Cette extrapolation est fondée sur la mesure de l'intensité E_{BCCH} du champ émis par le canal de commande de la station de base. Le processus décrit ci-après repose sur une analyse numérique et statistique de la réduction de puissance. Il fait intervenir des facteurs d'affaiblissement α . On pourra appliquer les étapes suivantes:

- hypothèse prudente: trafic maximal ($\alpha_{\text{traf}} = 1$);
- mesure de l'intensité du champ électrique dû aux différents systèmes hertziens;
- vérification du nombre de porteuses (n_c) de chaque système hertzien;
- définition de α_{APC} et α_{DTX} en tant que paramètres statistiques et expérimentaux (<1): il s'agit de facteurs d'affaiblissement résultant de la stratégie implémentée pour diminuer la puissance rayonnée (utilisation d'une commande automatique de puissance APC et d'une transmission discontinue DTX);
- la formule ci-après donne la puissance totale rayonnée par chaque système (P_{ext}) à partir de la puissance du canal de commande de la station de base (P_{BCCH}):

$$P_{ext} = P_{BCCH} + (n_c - 1) \times P_{BCCH} \alpha_{APC} \times \alpha_{DTX}$$

- l'intensité du champ électrique total rayonné par chaque système de transmission est donnée par la racine carrée de P_{ext} :

$$E_{ext} = E_{BCCH} \sqrt{1 + (n_c - 1) \times \alpha_{APC} \times \alpha_{DTX}}$$

Pour le système UMTS, d'autres méthodes pourraient être appliquées, suivant les caractéristiques des signaux. Dans le cas de systèmes analogiques, il suffit de multiplier par le nombre de porteuses la puissance rayonnée par une porteuse.

La dernière étape consiste à calculer l'intensité du champ électrique équivalent total, E_{TOT} , qui sera comparée à la valeur limite d'exposition. On l'obtient par la somme des écarts quadratiques moyens des contributions de chaque système de transmission (identifié par l'indice k):

$$E_{TOT} = \sqrt{\sum_k E_k^2 \leq E_{\text{lim}}(f)}$$

et, lorsque des limites propres aux différentes fréquences ont été définies:

$$\rho_E = \sqrt{\sum_k \frac{E_k^2}{E_{\text{lim}_k}^2}} \leq 1$$

Niveau d'incertitude: lorsqu'on applique des hypothèses prudentes (trafic maximal $\alpha_{\text{traf}} = 1$ par exemple) pour les procédures de traitement, l'intensité de champ en sortie du processus de post-traitement est comparée à la limite d'exposition.

Appendice I

Méthodes de calcul

I.1 Généralités

Le présent appendice donne des directives quant au choix de méthodes de calcul permettant d'évaluer les niveaux de champ EMF potentiellement dangereux. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer si le critère de conformité aux limites d'exposition est respecté:

- 1) la méthode temporelle des différences finies (FDTD, *finite-difference time-domain*);
- 2) la méthode temporelle des différences finies avec application à plusieurs régions (MR/FDTD, *multiple-region finite-difference time-domain*);
- 3) la méthode du tracé de rayon;
- 4) la méthode hybride tracé de rayon/FDTD;
- 5) les méthodes d'évaluation du champ d'antenne en zone de champ proche telles que la méthode des moments (MOM, *method of moments*) ou la méthode du code de simulation électromagnétique (NEC, *numeric electromagnetic code*).

Le choix de la méthode numérique appropriée dépend des facteurs suivants:

- 1) la zone de champ dans laquelle on veut évaluer le niveau d'exposition;
- 2) les grandeurs à évaluer (le taux SAR ou les champs de référence);
- 3) la topologie de l'environnement autour du lieu d'exposition.

Les critères de choix sont résumés dans le Tableau I.1.

Tableau I.1/K.61 – Critères de choix d'une technique numérique

Zone de champ	Topologie de l'environnement	Grandeur évaluée	Technique numérique applicable
Champ proche	Ouvert	Champs	FDTD, MOM
Champ proche	Ouvert	Taux SAR	FDTD
Champ proche	Fermé, plusieurs sources de diffusion	Champ	FDTD, MOM
Champ proche	Fermé, plusieurs sources de diffusion	Taux SAR	FDTD, MR/FDTD
Champ lointain	Ouvert	Champs	Méthode du tracé de rayon, MOM
Champ lointain	Plusieurs sources de diffusion (environnement urbain complexe)	Champs	Méthode du tracé de rayon

I.2 Description des méthodes

On trouvera ci-après une description plus détaillée des diverses méthodes susmentionnées.

I.2.1 FDTD

La méthode FDTD est la plus utile pour l'évaluation des niveaux d'exposition à proximité de l'antenne ou dans des lieux confinés en présence d'un environnement de diffusion complexe. L'algorithme FDTD est la méthode de calcul la plus utilisée pour modéliser le taux SAR [B3]. Il offre une grande souplesse de modélisation des structures inhomogènes présents dans les tissus et organes anatomiques.

La méthode FTDT peut être utilisée pour prédire les valeurs de champ dans des environnements de diffusion complexe grâce à la spécification de conditions limites pertinentes, ou pour prévoir les valeurs du taux SAR grâce à la spécification des propriétés diélectriques et des dimensions du corps humain ainsi que des conditions limites appropriées associées à un espace fermé ou ouvert (conditions limites de Mur, de Lio, avec retard ou fondées sur des couches parfaitement adaptées, par exemple).

Une forme d'onde sinusoïdale est généralement utilisée comme source d'excitation au point d'alimentation de l'antenne pour les calculs. La propagation du signal et son interaction avec les objets présents dans le domaine de calcul considéré sont modélisées par itérations numériques. L'algorithme FDTD modélise la propagation du champ par itération dans les domaines spatial et temporel jusqu'à ce que les conditions de champ dans l'espace de calcul atteignent un état stable sinusoïdal. La valeur du champ total aux niveaux des tissus sélectionnés peut être calculée afin de déterminer le taux SAR. Pour assurer la stabilité des calculs, la condition de courant qui garantit la relation minimale permettant le choix des résolutions temporelle et spatiale doit être respectée. La vitesse d'itération et les erreurs de calcul prévisibles dépendent des paramètres utilisés pour satisfaire à la condition de courant.

I.2.2 MR/FTDT

L'algorithme MR/FTDT [B4] permet de s'affranchir des insuffisances de la méthode FDTD pour les environnements comprenant de nombreuses régions peu denses. Le domaine spatial considéré est divisé en plusieurs sous-régions indépendantes distribuées dans un espace précédemment à

propagation libre. Les champs d'une sous-région sont déterminés au moyen d'une grille FDTD locale.

I.2.3 Méthode du tracé de rayon

La méthode du tracé de rayon est utile pour évaluer le champ dans une zone ouverte de grandes dimensions et dans un environnement urbain comprenant de multiples diffuseurs. On utilise dans la Rec. UIT-T K.52 un modèle simple à deux rayons. Celui-ci donne des résultats exacts dans une zone ouverte non limitée située dans une région plate de la Terre. Un environnement de diffusion plus complexe faisant intervenir entre autres des réflexions dues aux bâtiments et des fluctuations de l'altitude terrestre nécessite la mise en œuvre d'algorithmes à rayons multiples compliqués. La méthode du tracé de rayon a pour principal inconvénient d'être essentiellement une technique de champ lointain. Elle suppose également que la taille du diffuseur est grande par rapport à la longueur d'onde. Elle n'est pas adaptée au cas des grandes longueurs d'onde, lorsque le phénomène de diffraction est important. Cette méthode ne permet pas de calculer le taux SAR.

I.2.4 Méthode hybride FDTD/tracé de rayon

La technique hybride FDTD/tracé de rayon [B5] vise à concilier les avantages des deux méthodes. Le tracé de rayon est utilisé pour évaluer le champ incident tandis que la méthode FDTD est appliquée pour estimer le taux SAR d'un corps humain.

I.2.5 Méthode MOM

La méthode des moments (MOM) [B2] sert à évaluer l'intensité du champ émis par des antennes ou d'autres types de structures conductrices filaires fines et permet de calculer le champ diffusé par ces structures. L'utilisation de la méthode MOM pour déterminer le champ diffusé par une surface plane conductrice n'est possible que si celle-ci est modélisée par un treillis métallique. La structure géométrique de l'antenne et la géométrie des objets diffuseurs doivent être connues en détail. La méthode MOM ne permet pas de déterminer le niveau de pénétration du champ dans des organes diélectriques et n'est donc pas utilisable pour calculer le taux SAR. Des versions commerciales ou non commerciales de la méthode MOM sont disponibles.

I.3 Autres modèles de champ proche

Les algorithmes de tracé de rayon sont particulièrement utiles lorsque les lieux d'exposition étudiés sont suffisamment loin de la source de rayonnement, lorsque les champs réfléchis par les bâtiments sont de forte intensité et que le terrain est très accidenté. Pour la majorité des applications de télécommunication, la valeur du champ chute au-dessous du seuil limite à quelques mètres de la source. Une estimation précise du champ à proximité de l'antenne est donc requise. Outre la méthode MOM décrite au § I.2.5, il existe plusieurs autres méthodes d'évaluation du champ si la structure géométrique détaillée de l'antenne est connue. Ces méthodes peuvent également prendre en compte la diffusion due à des objets situés à proximité de l'antenne.

I.4 Problèmes pratiques

La nécessité d'une spécification précise de la géométrie constitue la principale difficulté pratique à l'application de techniques de calcul complexes (méthode du tracé de rayon ou méthode du code NEC, par exemple). En pratique, l'obstacle majeur à l'utilisation d'un modèle aussi simple que le tracé à deux rayons réside dans le manque de données fiables sur l'antenne et l'environnement du lieu d'exposition. Ainsi, les données terrain disponibles peuvent n'avoir qu'une résolution limitée. Par ailleurs, le diagramme d'antenne fourni par le fabricant peut n'être applicable qu'en zone de champ lointain. A proximité de l'antenne, le gain risque d'être plus petit et la direction des lobes latéraux risque d'être différente. Une solution peut alors consister à calculer le diagramme d'antenne en appliquant la méthode MOM si la géométrie de l'antenne est connue.

BIBLIOGRAPHIE

- [B1] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, Vol. 79, No. 4, pp. 494-522, 1998.
- [B2] HARRINGTON (R.F.): Field Computation by Moment Methods, *Wiley-IEEE Press*, avril 1993.
- [B3] KUNZ (K.S.), LUEBBERS (R.J.): The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, *CRC Press*, 2000.
- [B4] JOHNSON (J.M.), RAHMAT-SAMII (Y.), MR/FDTD: A Multiple-Region Finite-Difference – Time-Domain Method, *Microwave and Optical Technology Letters*, pp. 101-105, Vol. 14, No. 2, février 1997.
- [B5] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), PISA (S.), PIUZZI (E.): Human Exposure to Radio Base Station Antennas in Urban Environment, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 11, novembre 2000.
- [B6] BERNARDI (P.), CAVAGNARO (M.), D'ATANASIO (P.), DI PALMA (E.), PISA (S.) and PIUZZI (E.): FDTD, Multiple-Region/ FDTD, Ray-Tracing/FDTD: a Comparison on their Applicability for Human Exposure Evaluation, *International Journal on Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, pp. 579-593, Vol. 15, 2002.
- [B7] MUR (G.): Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the time-Domain electromagnetic Field Equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 23(4), pp. 377-382, novembre 1981.
- [B8] FARAONE (A.), YEW-SIOW TAY (R.), JOYNER (K.H.), BALZANO (Q.): Estimation of the Average Power Density of Cellular Base Station Collinear Array Antennas, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, Vol. 49, No. 3, mai 2000.

SÉRIES DES RECOMMANDATIONS UIT-T

Série A	Organisation du travail de l'UIT-T
Série B	Moyens d'expression: définitions, symboles, classification
Série C	Statistiques générales des télécommunications
Série D	Principes généraux de tarification
Série E	Exploitation générale du réseau, service téléphonique, exploitation des services et facteurs humains
Série F	Services de télécommunication non téléphoniques
Série G	Systèmes et supports de transmission, systèmes et réseaux numériques
Série H	Systèmes audiovisuels et multimédias
Série I	Réseau numérique à intégration de services
Série J	Réseaux câblés et transmission des signaux radiophoniques, télévisuels et autres signaux multimédias
Série K	Protection contre les perturbations
Série L	Construction, installation et protection des câbles et autres éléments des installations extérieures
Série M	RGT et maintenance des réseaux: systèmes de transmission, circuits téléphoniques, télégraphie, télécopie et circuits loués internationaux
Série N	Maintenance: circuits internationaux de transmission radiophonique et télévisuelle
Série O	Spécifications des appareils de mesure
Série P	Qualité de transmission téléphonique, installations téléphoniques et réseaux locaux
Série Q	Commutation et signalisation
Série R	Transmission télégraphique
Série S	Equipements terminaux de télégraphie
Série T	Terminaux des services télématiques
Série U	Commutation télégraphique
Série V	Communications de données sur le réseau téléphonique
Série X	Réseaux de données et communication entre systèmes ouverts
Série Y	Infrastructure mondiale de l'information, protocole Internet et réseaux de nouvelle génération
Série Z	Langages et aspects généraux logiciels des systèmes de télécommunication