



UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

UIT-T

SECTEUR DE LA NORMALISATION
DES TÉLÉCOMMUNICATIONS
DE L'UIT

K.62

(02/2004)

SÉRIE K: PROTECTION CONTRE LES
PERTURBATIONS

**Evaluation par modélisation mathématique de la
conformité d'un système aux limites de
rayonnement**

Recommandation UIT-T K.62

Recommandation UIT-T K.62

Evaluation par modélisation mathématique de la conformité d'un système aux limites de rayonnement

Résumé

La présente Recommandation vise à aider les opérateurs de télécommunications à démontrer la conformité avec les limites prescrites des rayonnements produits par les systèmes de télécommunication.

Les systèmes de télécommunication mis en place par les opérateurs sont constitués par de nombreux éléments conçus chacun pour respecter les conditions en matière de compatibilité électromagnétique, et notamment pour ce qui est des rayonnements. Cela signifie qu'un système contiendra en principe un certain nombre de sources de rayonnements (c'est-à-dire d'éléments d'équipement distincts) sur des fréquences communes. Cela est vrai si le système est constitué de nombreux éléments du même équipement ou de nombreux éléments d'équipements différents.

Pour ces systèmes, la superposition de ces rayonnements peut se traduire par un niveau de rayonnement du système supérieur à la limite prescrite pour le système. Il s'agit là d'une préoccupation essentielle des opérateurs de télécommunications qui cherchent à démontrer la conformité de leur système avec les limites de rayonnement.

La présente Recommandation présente une approche statistique pour la vérification de la conformité avec les limites des rayonnements des systèmes. La méthode présentée ici, basée sur l'approche statistique appliquée au traitement de variables qui ne sont pas connues de l'opérateur, permet de décrire le niveau de rayonnement du système de manière statistique en termes de distribution de probabilité et de distribution de probabilité cumulative.

Ces distributions permettent d'exprimer la conformité du niveau de rayonnement du système avec une limite sous forme d'intervalles de confiance (et non pas sous forme "oui" ou "non"). On propose de retenir le niveau de confiance de 80% pour déclarer la conformité afin de s'aligner avec l'approche retenue dans la norme CISPR 22 pour les équipements produits en série.

La méthode présentée peut être également utilisée par d'autres organisations qui construisent ou exploitent d'autres systèmes en intégrant de nombreux éléments d'équipement électronique numérique dont chacun respecte leur propre limite de rayonnement.

Source

La Recommandation K.62 de l'UIT-T a été approuvée le 29 février 2004 par la Commission d'études 5 (2001-2004) de l'UIT-T selon la procédure définie dans la Recommandation UIT-T A.8.

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 2
4	Abréviations et acronymes 3
5	Principes généraux..... 3
6	Méthode 5
6.1	Carte système..... 6
6.2	Composition du système..... 7
6.3	Rayonnements des équipements..... 7
6.4	Fréquences communes de rayonnement..... 8
6.5	Points d'évaluation..... 8
6.6	Matrice d'espacement 8
6.7	Méthode d'évaluation 9
Appendice I – Exemples de distribution.....	11
I.1	N = 2 11
I.2	N = 3 12
I.3	N = 4 13
I.4	N = 5 14
I.5	N = 10 15
I.6	N = 100 16
I.7	Analyse des distributions de probabilité..... 17

Introduction

Les systèmes de télécommunication mis en place par les opérateurs sont constitués par de nombreux éléments conçus chacun pour respecter les conditions en matière de compatibilité électromagnétique, et notamment pour ce qui est des rayonnements. Cela signifie qu'un système contiendra en principe un certain nombre de sources de rayonnements (c'est-à-dire d'éléments d'équipement distincts) sur des fréquences communes. Cela est vrai si le système est constitué de nombreux éléments du même équipement ou de nombreux éléments d'équipements différents.

On s'attend à ce que le système considéré comme un tout respecte les limites de rayonnement. Cela pourra être vrai ou différent relativement à la limite applicable à chaque constituant de l'équipement. Pour chaque fréquence commune de rayonnement, la présence de nombreuses sources individuelles à l'intérieur de l'équipement signifie que le niveau de rayonnement du système pourra être supérieur à celui d'un équipement individuel.

La méthode permet l'évaluation des rayonnements sans devoir procéder à des mesures pratiques. Cette méthode convient particulièrement à l'analyse de très gros systèmes, pour lesquels le coût des tests pratiques est prohibitif et pour lesquels ces tests sont difficiles à réaliser dans la pratique.

Recommandation UIT-T K.62

Evaluation par modélisation mathématique de la conformité d'un système aux limites de rayonnement

1 Domaine d'application

Dans la présente Recommandation, on présente une procédure permettant de montrer la conformité des rayonnements RF de systèmes de télécommunication aux limites prescrites.

Les systèmes de télécommunication mis en place par les opérateurs sont constitués par de nombreux éléments conçus chacun pour respecter les conditions en matière de compatibilité électromagnétique, et notamment pour ce qui est des rayonnements. Cela signifie qu'un système contiendra en principe un certain nombre de sources de rayonnements (c'est-à-dire d'éléments d'équipement distincts) sur des fréquences communes. Cela est vrai si le système est constitué de nombreux éléments du même équipement ou de nombreux éléments d'équipements différents.

Pour ces systèmes, la superposition de ces rayonnements peut se traduire par un niveau de rayonnement du système supérieur à la limite prescrite pour le système. Il s'agit là d'une préoccupation essentielle des opérateurs de télécommunications qui cherchent à démontrer la conformité de leur système avec les limites de rayonnement.

La présente Recommandation présente une approche statistique pour la vérification de la conformité avec les limites des rayonnements des systèmes. La méthode présentée ici, basée sur l'approche statistique appliquée au traitement de variables qui ne sont pas connues de l'opérateur, permet de décrire le niveau de rayonnement du système de manière statistique en termes de distribution de probabilité et de distribution de probabilité cumulative.

Ces distributions permettent d'exprimer la conformité du niveau de rayonnement du système avec une limite sous forme d'intervalles de confiance (et non pas sous forme "oui" ou "non"). On propose de retenir le niveau de confiance 80% pour déclarer la conformité afin de s'aligner avec l'approche retenue dans la norme CISPR 22 pour les équipements produits en série.

La méthode présentée peut être également utilisée par d'autres organisations qui construisent ou exploitent d'autres systèmes en intégrant de nombreux éléments d'équipement électronique numérique dont chacun respecte leur propre limite de rayonnement.

La présente Recommandation ne définit pas les limites de rayonnement ou les méthodes de mesure applicables aux systèmes de télécommunication.

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] CISPR 22 (1997), *Appareils de traitement de l'information – Caractéristiques des perturbations électriques – Limites et méthodes de mesure.*
- [2] Recommandation UIT-R P.525-2 (1994), *Calcul de la propagation en espace libre.*
- [3] Recommandation UIT-R P.526-8 (2003), *Propagation par diffraction.*

3 Termes et définitions

La présente Recommandation définit les termes suivants:

3.1 équipement: dans la présente Recommandation, ce terme s'applique à un élément qui forme un module de base d'un système. Un équipement est généralement fourni à l'opérateur de télécommunication par un fabricant et est mis sur le marché comme élément distinct. En conséquence, un équipement devra être conçu pour respecter les prescriptions locales en matière d'EMC, y compris pour ce qui est des rayonnements.

3.2 système: dans la présente Recommandation, ce terme s'applique à un élément formé à partir de l'intégration de nombreux éléments d'équipement, situés tous en un même lieu physique, pour fournir une fonction définie. Tous les câbles utilisés pour interconnecter l'équipement constituant, qui tous ensemble forment le système, font également partie du système. Tous les câbles d'interconnexion qui relient un système à d'autres systèmes ne sont pas considérés comme faisant partie du système.

3.3 niveau de rayonnement du système: désigne le niveau de rayonnement du système résultant de la superposition des rayonnements sur une fréquence commune des équipements constitutifs du système.

Dans la présente Recommandation, ce terme est représenté mathématiquement par le symbole E_S .

3.4 distribution de probabilité: la distribution de probabilité d'une variable continue non connue x , définie dans la fourchette $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ est désignée par $p(x)$. La distribution de probabilité quantifie la probabilité (c'est-à-dire la fréquence relative d'occurrence) avec laquelle la variable existera dans la fourchette x et $x + dx$.

Par définition:

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} p(x) dx = 1$$

3.5 distribution de probabilité cumulative: la distribution de probabilité cumulative d'une variable continue non connue x , existant dans la fourchette $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ s'écrit $CP(x)$. La distribution de probabilité cumulative identifie la probabilité (c'est-à-dire la fréquence relative d'occurrence) avec laquelle la variable x existe dans la fourchette:

$$x_{min} \leq x \leq x''$$

dans laquelle x' se trouve dans la fourchette $x_{min} \leq x \leq x_{max}$

Par définition;

$$CP(x) = \int_{x_{min}}^{x'} p(x) dx$$

3.6 probabilité de conformité: il s'agit de la probabilité (c'est-à-dire la fréquence relative d'occurrence) avec laquelle le niveau de rayonnement du système, E_S , se trouvera dans la fourchette:

$$E_{Smin} \leq E_S \leq E_L$$

où:

E_{Smin} est la limite inférieure (c'est-à-dire la valeur minimale) du niveau de rayonnement du système

E_L est la limite de rayonnement du système

La probabilité de conformité est donc la probabilité avec laquelle le niveau de rayonnement du système respectera la limite de rayonnement du système.

La probabilité de conformité est la probabilité cumulative pour $E_S = E_L$, c'est-à-dire:

$$\text{probabilité de conformité} = \int_{E_{Smin}}^{E_L} p(E_S) dE_S$$

4 Abréviations et acronymes

La présente Recommandation utilise les abréviations suivantes:

CPD distribution de probabilité cumulative (*cumulative probability distribution*)

EMC compatibilité électromagnétique (*electromagnetic compatibility*)

ITE équipement de traitement de l'information (*information technology equipment*)

PD distribution de probabilité (*probability distribution*)

RF radiofréquence

5 Principes généraux

Lorsqu'un système contient un certain nombre d'éléments d'équipements dont chacun rayonne sur une fréquence commune, la superposition de ces rayonnements peut conduire à un niveau de rayonnement du système qui est supérieur au niveau type de rayonnement d'un équipement. Cela constitue un problème pour les opérateurs de télécommunications qui cherchent à gérer de manière responsable la compatibilité électromagnétique de leurs systèmes.

Lorsque le niveau de rayonnement de chaque équipement est connu (à une certaine distance de mesure) pour chaque fréquence commune de rayonnement, il existe des outils mathématiques permettant de prédire le niveau de rayonnement du système à cette fréquence commune.

Supposons un nombre, N , de rayonnements RF produit à une fréquence commune, f , parvient en un certain point de mesure. Il est possible de représenter chaque rayonnement au point de mesure considéré dans le domaine temps sous forme d'une simple fonction cosinus. Le i -ème rayonnement peut s'écrire comme suit:

$$E_i(t) = E_{0i} \cos(\alpha \pm \omega t) \quad (1)$$

où:

$E_i(t)$ est le niveau de rayonnement instantané dû au i -ème rayonnement à l'instant, t , au niveau du point de mesure

E_{0i} est l'amplitude du i -ème rayonnement au point de mesure

α_i est la différence de phase entre le i -ème rayonnement et une référence choisie au point de mesure considéré

$$\omega = 2\pi f$$

La combinaison de ces rayonnements au point de mesure peut également s'exprimer sous forme d'une simple fonction cosinus de même fréquence, à savoir:

$$E_0(t) = E_0 \cos(\alpha \pm \omega t) \quad (2)$$

où:

$E_0(t)$ est le niveau d'émission instantané combiné à l'instant t au point de mesure considéré

E_0 est l'amplitude du niveau de rayonnement combiné

α est la différence de phase entre le i -ème rayonnement et une référence choisie au point de mesure considéré

et

$$E_0^2 = \sum_{i=1}^N E_{0i}^2 + 2 \sum_{j>i}^N \sum_{i=1}^N E_{0i} E_{0j} \cos(\alpha_i - \alpha_j) \quad (3)$$

Un examen attentif de cette équation montre que, pour connaître l'amplitude du niveau de rayonnement combiné E_0 , deux informations sont nécessaires pour chaque rayonnement. A savoir:

- l'amplitude, E_{0i} ;
- la phase, α_i , par rapport à une certaine référence.

Bien qu'il puisse généralement connaître l'amplitude E_{0i} au point de référence, l'opérateur de télécommunications peut ne pas connaître la valeur de la phase en ce point. Cela signifie que l'opérateur ne dispose que de la moitié de l'information nécessaire pour utiliser cette équation. Par conséquent, les outils mathématiques conventionnels ne sont pas parfaitement adaptés à la solution de ce problème.

Il est possible pour l'opérateur de télécommunications d'utiliser des outils mathématiques conventionnels pour déterminer la limite supérieure du niveau de rayonnement du système. Il s'agit du niveau de rayonnement du système produit lorsque chaque rayonnement de chaque équipement arrive en phase au point de mesure. Toutefois, il n'est pas recommandé de prendre en considération la limite supérieure du niveau de rayonnement du système pour déterminer la conformité des rayonnements RF du système.

En l'absence d'informations spécifiques, il est possible de supposer que la valeur de la phase pour chaque rayonnement est:

- capable de prendre une valeur quelconque dans sa fourchette de valeurs physiques;
- que la probabilité de prendre une valeur quelconque dans cette fourchette de valeurs est identique.

Il s'agit donc de deux propriétés d'une variable aléatoire mathématique. Par conséquent, on peut tout à fait supposer que la phase pour chaque rayonnement est aléatoire.

L'examen de l'équation (3) montre une périodicité en 2π , c'est-à-dire que toutes les valeurs uniques apparaissent lorsque la valeur de la phase évolue dans la fourchette $0 \leq \theta \leq 2\pi$. Cela signifie que le terme de phase ne peut plus être décrit par une valeur finie connue. On peut le décrire par une distribution de probabilité, $p(\theta)$. Les propriétés mathématiques de θ indiqués précédemment conduisent à une valeur de densité de probabilité ayant l'allure donnée dans la Figure 1, c'est-à-dire la densité probabilité aléatoire ou la densité de probabilité rectangulaire (en raison de sa forme).

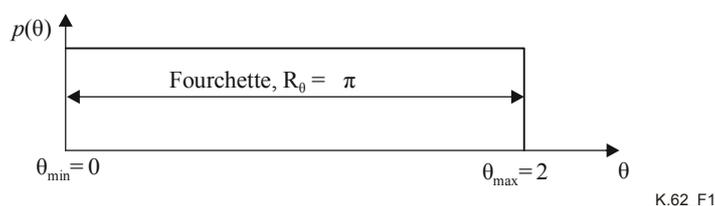


Figure 1/K.62 – Densité de probabilité rectangulaire/aléatoire

A partir de la définition de la densité de probabilité aléatoire, la valeur de $p(\theta)$ est donnée par la relation:

$$p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad (4)$$

L'utilisation d'une densité de probabilité pour représenter la valeur de chaque terme de phase dans l'équation (3) permet de générer la densité de probabilité associée pour le niveau de rayonnement du système.

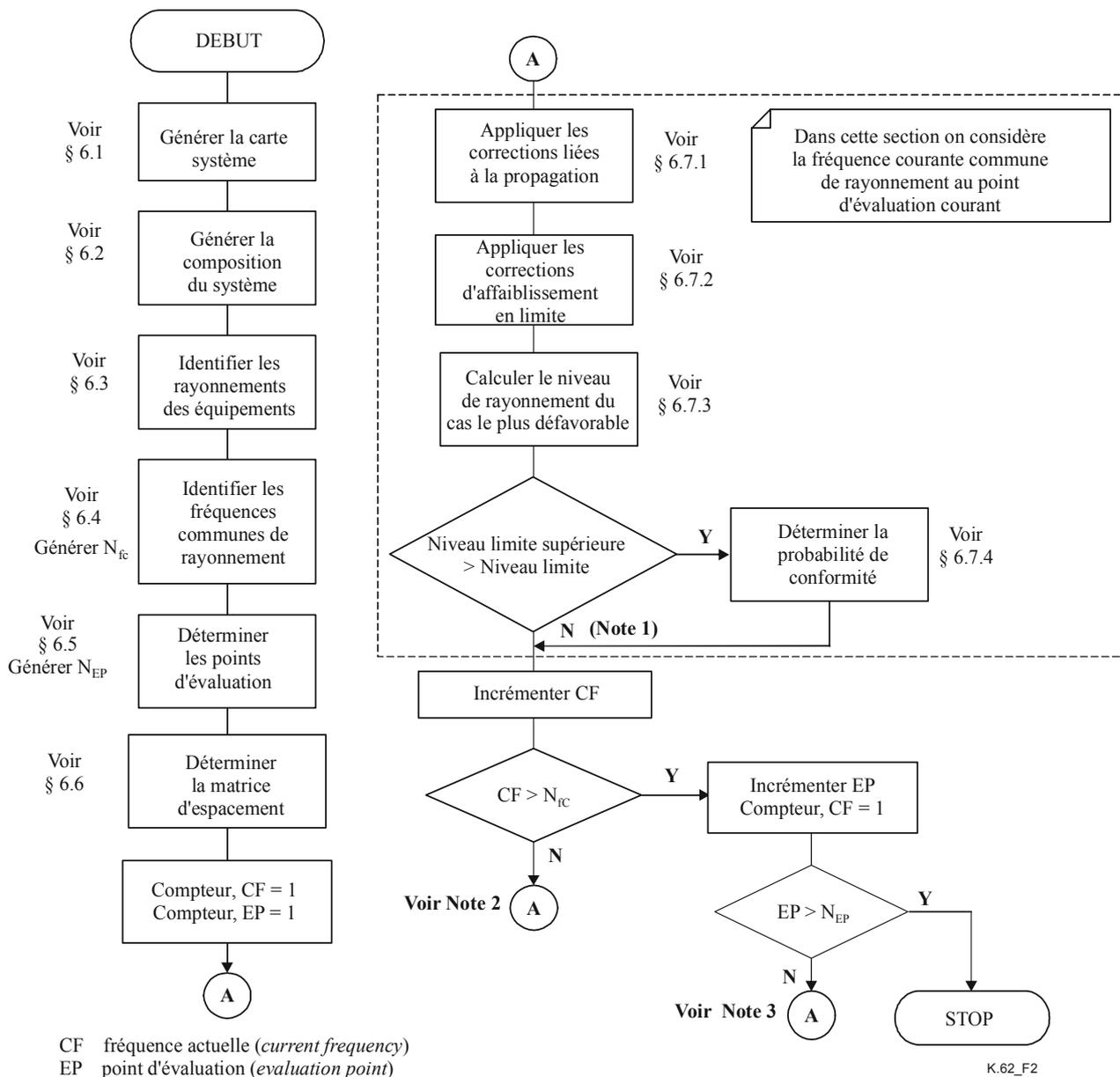
La connaissance de la densité de probabilité permet la génération de la densité de probabilité cumulative associée au rayonnement du système. Lorsque la limite supérieure du niveau de rayonnement du système dépasse la limite de rayonnement définie, la densité de probabilité cumulative peut être utilisée pour quantifier la probabilité de conformité du système avec cette limite.

Dans l'Appendice I, on donne des exemples de densité de probabilité et de densité de probabilité cumulative obtenues en utilisant cette approche. Les exemples servent à illustrer le fait qu'il est très peu probable que le niveau de rayonnement du système prenne la valeur limite supérieure. C'est la raison pour laquelle il faut rejeter l'utilisation de la limite supérieure du niveau de rayonnement du système pour la détermination de la conformité des rayonnements RF produits par le système. Les exemples servent également à illustrer le fait qu'en général la probabilité pour que le niveau de rayonnement du système prenne une valeur qui est inférieure à la valeur limite supérieure sera très forte.

On admet que le système respecte la limite de rayonnement définie si la probabilité de conformité avec cette limite n'est pas inférieure à 80%. Cette approche s'aligne avec celle utilisée au § 7.2 de [1].

6 Méthode

Le présent paragraphe présente un aperçu général de la méthode à appliquer pour l'évaluation des rayonnements d'un système. Cette méthode implique l'exécution du processus résumé dans l'organigramme de la Figure 2. Il est recommandé de tenir compte de cet organigramme tout au long du présent paragraphe.



NOTE 1 – Si limite supérieure < niveau limite, la probabilité de conformité est de 100%.

NOTE 2 – Répéter le processus au point d'évaluation suivant, en considérant la fréquence commune de rayonnement suivantes.

NOTE 3 – Répéter le processus au point d'évaluation suivant, en commençant à la première fréquence de rayonnement commune.

Figure 2/K.62 – Méthode applicable aux rayonnements des systèmes

6.1 Carte système

Une carte système doit être produite. Il s'agit d'un simple diagramme qui représente la position des équipements constitutifs du système et des limites du système.

La limite du système est généralement définie comme étant la limite physique au-delà de laquelle les rayonnements peuvent dégrader la réception des services radioélectriques. La limite système est généralement la limite entre une zone fermée qui est sous le contrôle d'un opérateur et un espace public dans lequel les opérateurs de services radioélectriques (non associés à l'opérateur) sont libres de s'installer. La limite système par conséquent dépend de la nature du système et de ses coordonnées.

La limite système peut être:

- une "clôture" pour les systèmes installés dans un site placé sous le contrôle de l'opérateur;

- un mur extérieur – pour les systèmes installés dans un bâtiment placé sous le contrôle d'un opérateur mais qui ne disposent pas d'un terrain supplémentaire environnant (caractéristique des bâtiments urbains);
- des murs internes pour les systèmes installés dans des bâtiments multifonctions, à l'intérieur duquel l'opérateur a le contrôle d'une zone définie, le reste du bâtiment étant partagé avec d'autres utilisateurs (caractéristiques des zones urbaines).

6.2 Composition du système

Une liste des équipements contenus dans le système sera établie. Dans cette liste seront en général consignés:

- la fonction de l'équipement;
- le nom de l'équipement (donné par le fabricant);
- le fabricant de l'équipement;
- le nombre d'éléments d'équipement existants dans le système.

6.3 Rayonnements des équipements

On doit donner des informations concernant les caractéristiques de rayonnement de chaque équipement. Essentiellement, quatre éléments d'information doivent être fournis pour chaque rayonnement:

- la fréquence;
- la polarisation (horizontale ou verticale);
- le niveau;
- la distance de mesure.

Lorsqu'on en dispose, les rapports de test de compatibilité électromagnétique de l'équipement peuvent permettre l'identification de cette information pour les rayonnements les plus intenses mesurés (ceux-ci étant en dessous de la limite de rayonnement pour laquelle l'équipement est conçu).

Si l'on ne dispose pas de ces rapports, il est possible d'effectuer des mesures de rayonnement d'un élément d'équipement pour permettre l'identification des fréquences et des niveaux auxquels les rayonnements les plus intenses ont été mesurés (ceux-ci étant inférieurs à la limite de rayonnement pour lequel l'équipement a été conçu).

Dans les deux cas, il faut veiller pendant la compilation de ces informations à ce que la configuration de l'équipement pendant le test soit aussi représentative que possible de son implantation dans le système. Les principaux points sont les suivants:

- situation: pour les essais, l'équipement devra occuper la même position que dans le système;
- câblage: pour les essais, la configuration de l'équipement devra avoir inclut les mêmes interconnexions que dans le système, avec les mêmes types de câble et la même signalisation (simulée ou appliquée);
- fonctionnement: l'équipement devra fonctionner d'une manière représentative de son fonctionnement normal lorsqu'il est utilisé dans le système (cela étant lié au câblage comme indiqué ci-dessus).

Si l'on ne dispose pas des rapports de test et que des mesures de rayonnement ne sont pas effectuées sur un élément d'équipement, il est possible de faire une hypothèse par défaut: les rayonnements de l'élément d'équipement sont au niveau de la limite de rayonnement pour lequel il a été conçu et sur toute la fourchette de fréquences. Cette situation par défaut constitue un scénario beaucoup plus

défavorable, étant donné qu'en général les équipements de télécommunication ne rayonnent pas à des niveaux proches de leur limite de rayonnement sur toute la fourchette de fréquences couverte par cette limite; en réalité, les rayonnements produits par l'équipement sont proches de la limite pour seulement une petite proportion de la fourchette totale de fréquences couverte par une limite.

On doit supposer que chaque élément d'équipement rayonne de manière totalement isotrope aux fréquences et aux niveaux identifiés par cette méthode.

6.4 Fréquences communes de rayonnement

Les données indiquées au § 6.3 doivent permettre l'identification des fréquences communes d'émission dans le système; c'est-à-dire les fréquences auxquelles plusieurs éléments d'équipement émettent avec la même polarisation.

On pourra ainsi déterminer la valeur de N_{fc} , qui est le nombre de fréquences communes d'émission dans le système.

Pour chaque fréquence commune d'émission, on doit disposer des informations suivantes:

- la fréquence;
- l'équipement émettant à cette fréquence;
- la polarisation.

6.5 Points d'évaluation

La carte système, la composition du système et les rayonnements des équipements doivent être examinés pour produire un ensemble de points d'évaluation. Les points d'évaluation sont les positions sur la carte système qui se trouvent en dehors des limites géographiques du système auquel les rayonnements émis par le système doivent être évalués.

Il est recommandé d'étudier les rayonnements sur plusieurs points d'évaluation (N_{EP}), c'est-à-dire que les niveaux des rayonnements du système ne doivent pas être étudiés en un seul point. Le nombre de points d'évaluation doit de préférence être d'autant plus grand que la taille physique du système étudié est grande.

Les facteurs à prendre en considération pour la sélection des points d'évaluation sont les suivants:

- les positions connues des utilisateurs existants de systèmes radioélectriques – ces positions nécessitent une attention toute particulière;
- les cas où les éléments d'équipement sont situés à de faibles distances de la limite physique du système (en résumé à une distance inférieure ou égale à la distance à laquelle les émissions ont été mesurées); cela est particulièrement vrai si ces éléments ont déjà été identifiés comme ayant des fréquences communes de rayonnement et émettant individuellement à des niveaux relativement élevés;
- les points adjacents à la limite physique du système avec une forte probabilité de présence de systèmes radioélectriques (telles les habitations à forte densité pour les systèmes situés dans les zones urbaines, les zones résidentielles pour les systèmes situés dans les zones suburbaines);
- les zones accessibles au public et qui sont immédiatement adjacentes à la limite physique du système (qui présente un intérêt particulier pour étudier les risques de brouillage par le système des services de radiocommunication mobiles publics, telle la téléphonie mobile).

6.6 Matrice d'espacement

Une matrice d'espacement doit être établie. Elle doit indiquer l'espacement en ligne droite entre chaque élément d'équipement dans le système et chaque point d'évaluation.

6.7 Méthode d'évaluation

Pour chaque point d'évaluation retenu et chaque fréquence commune de rayonnement identifiée, les rayonnements du système doivent être déterminés au moyen de la procédure suivante:

6.7.1 Correction I: propagation

La carte système doit être consultée pour déterminer le trajet de propagation entre chaque élément de l'équipement et chaque point d'évaluation.

La complexité des trajets de propagation est variable. Par exemple (par ordre de complexité croissante):

- i) trajet avec occultation: il n'existe pas de trajet de propagation simple en ligne droite entre l'équipement et le point d'évaluation – certains édifices à structure conductrice entre l'équipement et le point d'évaluation font essentiellement écran au rayonnement de l'équipement;
- ii) trajet direct: il existe un trajet de propagation simple en ligne droite entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation, trajet dépourvu de structures conductrices susceptibles de provoquer une réflexion, une diffraction ou une occultation des rayonnements de l'équipement vers le point d'évaluation. Cette ligne droite peut franchir un certain nombre de limites qui doivent être prises en considération (voir § 6.7.2);
- iii) trajet avec réflexion indirecte: il existe un trajet indirect entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation qui fait intervenir au moins une réflexion des rayonnements produits par l'équipement par une structure conductrice adjacente;
- iv) trajet avec diffraction indirecte: il existe un trajet indirect entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation qui fait intervenir la diffraction émission des rayonnements produits par l'équipement par une structure conductrice adjacente;
- v) trajet complexe: il existe un trajet de propagation entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation qui fait intervenir un ou plusieurs des types de trajet décrits ci-dessus.

La réduction de niveau (c'est-à-dire l'affaiblissement de propagation) des rayonnements de l'équipement qui parviennent au point d'évaluation augmente aussi avec la complexité du trajet de propagation. Il est ainsi possible d'exécuter plusieurs itérations dans lesquelles sont introduits progressivement des trajets de propagation de plus en plus complexes. Dans la première itération, on ne prendra en considération que les trajets avec occultation et les trajets directs. Dans la deuxième itération, on pourra prendre en considération les trajets avec occultation, les trajets directs et les trajets avec réflexion du premier ordre (trajets avec une seule réflexion). La troisième itération pourra tenir compte des trajets avec occultation, des trajets directs et des trajets avec réflexion du premier et du deuxième ordre.

Il est nécessaire d'ajuster les niveaux de rayonnement des équipements identifiés au § 6.3 pour tenir compte des trajets de propagation entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation.

Dans l'ajustement, on pourra prendre tout modèle de propagation radioélectrique que l'on estime appliquer compte tenu de la fréquence d'émission et le trajet de propagation étudiés. On trouvera dans les références [2] et [3] deux exemples.

Au minimum, en l'absence d'un modèle de propagation radioélectrique connu et validé, on pourra supposer une propagation en espace libre et en champ lointain, ce qui implique l'utilisation de l'équation de propagation suivante:

$$E_0(d_2) = E_0(d_1) - 20 \log_{10} \left\{ \frac{d_2}{d_1} \right\} \quad (5)$$

où:

d_1 est l'espacement en mètres entre l'équipement et l'antenne de mesure pendant les mesures de rayonnement

d_2 est l'espacement en mètres entre l'équipement et le point d'évaluation

$E_0(d_1)$ est l'amplitude du rayonnement de l'équipement (exprimée en unités logarithmiques) mesurée à la distance d_1 ;

$E_0(d_2)$ est l'amplitude du rayonnement de l'équipement (exprimée en unités logarithmiques) prédite à la distance d_2 due à la propagation entre la distance d_1 et d_2 .

La valeur de d_2 se trouve inscrite dans la matrice d'espacement pour chaque élément d'équipement émettant sur la fréquence commune.

6.7.2 Correction II: affaiblissement en limite

Lorsque le trajet de propagation entre l'élément d'équipement et le point d'évaluation franchit une ou plusieurs limites physiques (murs, barrières, etc.), les niveaux de rayonnement de l'équipement identifiés au § 6.3 peuvent être corrigés par les valeurs d'affaiblissement en limite lorsque celles-ci sont connues.

Si ces valeurs ne sont pas connues, l'opérateur peut utiliser des valeurs types découlant des expériences précédentes.

Il est également possible de faire l'hypothèse d'absence d'affaiblissement en limite physique. Cette hypothèse aura pour effet d'augmenter le niveau de rayonnement du système.

6.7.3 Hypothèse I: rayonnement maximal du système

Après avoir exécuté les opérations décrites du § 6.1 jusqu'au § 6.7.2, les niveaux d'émission corrigés de l'équipement au point d'évaluation courant sont disponibles.

Pour chaque fréquence d'émission étudiée, la limite supérieure applicable au niveau de rayonnement du système est calculé au moyen de l'équation suivante:

$$E_{MAX} = \sum_{i=1}^N E_{0i} \quad (6)$$

où:

N est le nombre d'éléments d'équipement différents du système émettant à la fréquence commune avec la polarisation prise en considération

E_{0i} est l'amplitude ajustée (c'est-à-dire l'amplitude au niveau du point d'évaluation exprimée en unités linéaires) des rayonnements du i -ème type d'équipement à la fréquence commune étudiée

E_{MAX} est la limite supérieure du niveau d'émission du système (exprimée en unités linéaires) à la fréquence commune d'émission étudiée

La limite supérieure du niveau de rayonnement du système est comparée à la limite de rayonnement du système.

Si cette limite supérieure est égale ou inférieure à la limite de rayonnement du système, les rayonnements du système respectent nettement la limite pour la fréquence et la polarisation étudiées. Si cela est vrai, aucune mesure supplémentaire est nécessaire pour la fréquence commune de rayonnement courante au point d'évaluation courant.

Si toutefois la limite supérieure du niveau de rayonnement du système dépasse la limite de rayonnement du système, il est nécessaire de passer à l'étape suivante, exposée au § 6.7.4.

6.7.4 Evaluation II: analyse de Monte Carlo

Si la limite supérieure du niveau de rayonnement du système obtenue au moyen de l'équation (6) est supérieure à la limite du rayonnement du système, on peut appliquer des techniques de simulation de Monte Carlo à l'équation (3) pour générer de manière numérique la distribution de probabilité cumulative qui décrit le niveau de rayonnement du système.

La densité de probabilité cumulative est utilisée pour obtenir la probabilité de conformité du niveau de rayonnement du système avec la limite de rayonnement du système.

Si la probabilité de conformité est supérieure ou égale à 80%, les rayonnements du système sont supposés respecter les limites du rayonnement du système pour la fréquence et la polarisation considérées.

Si tel n'est pas le cas, il est conseillé à l'opérateur de télécommunications de revoir tout d'abord le niveau de détail pris en considération dans l'évaluation qu'il a faite.

Si au terme de l'évaluation, on considère que tous les éléments de l'équipement émettent leur niveau limite sur toute la fourchette de fréquence de la limite (voir § 6.3), on recommande de répéter l'analyse pour identifier les fréquences communes et les détails concernant les rayonnements de l'équipement émettant à ces fréquences.

Si dans l'évaluation, on a pris en considération seulement la correction minimale de propagation (voir § 6.7.1), on recommande de répéter l'analyse en appliquant des corrections de propagation plus précises.

Si dans l'évaluation, on n'a pas pris en considération les valeurs d'affaiblissement aux limites (voir § 6.7.2), malgré la présence de limites physiques pour le système considéré, on recommande de répéter l'analyse en incluant les valeurs d'affaiblissement aux limites.

Si la probabilité de conformité reste inférieure à 80% après avoir tenu compte des facteurs ci-dessus dans l'analyse, on recommande à l'opérateur de télécommunications de chercher à abaisser le niveau de rayonnement du système de manière à obtenir une probabilité de conformité d'au moins 80%. L'utilisation des techniques de simulation de Monte Carlo permet d'étudier les conséquences de nombreuses modifications possibles. On recommande d'appliquer au système les modifications les plus pratiques à implémenter.

Appendice I

Exemples de distribution

Le présent appendice présente et examine certains exemples de distribution de probabilité et de distribution de probabilité cumulative générée en appliquant la méthode exposée dans la présente Recommandation.

I.1 N = 2

Lorsque le système contient deux éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité cumulative a une forme caractéristique. Les Figures I.1 et I.2 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont communes (dans ce cas $E_1 = E_2 = 40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$).

L'examen des Figures I.1 et I.2 montre que l'amplitude du niveau d'émission du système est compris entre la limite supérieure de $46 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ($40 \text{ dB}\mu\text{V/m} + 20 \log_{10}\{2\}$) et une limite inférieure nulle.

La Figure I.1 montre que la densité de probabilité présente un maximum net correspondant au cas du niveau de champ correspondant au cas le plus défavorable: la probabilité d'avoir l'amplitude au niveau du système correspondant au cas le plus défavorable est par conséquent la plus forte.

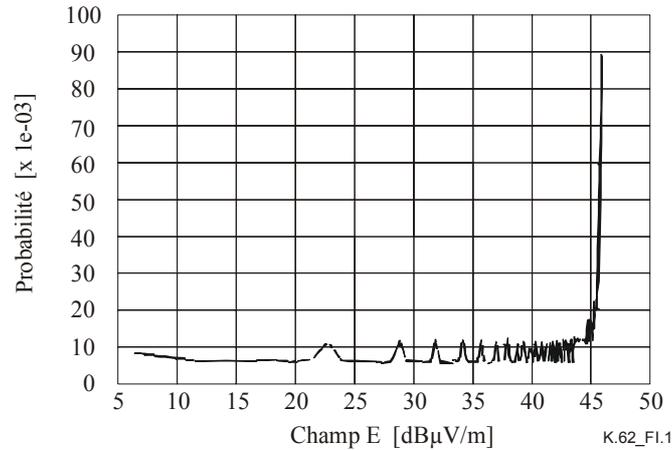


Figure I.1/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 2

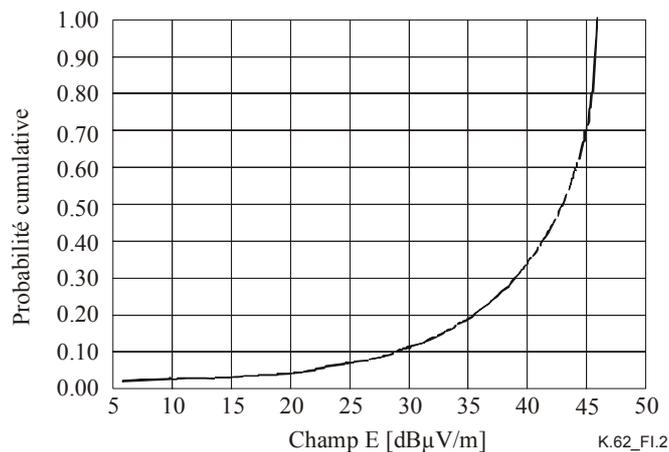


Figure I.2/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 2

I.2 N = 3

Lorsque le système contient trois éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité et la densité de probabilité cumulative présentent aussi une forme distincte. Les Figures I.3 et I.4 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont communes (dans ce cas $E_1 = E_2 = E_3 = 40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$).

L'examen de ces figures montre que l'amplitude du niveau d'émission du système est compris entre la limite supérieure de $49 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ($40 \text{ dB}\mu\text{V/m} + 20 \log_{10}\{3\}$) et une limite inférieure nulle.

Dans la Figure I.3, on constate que la densité de probabilité présente un maximum net au point d'amplitude d'émission commune, c'est-à-dire lorsque $E_S = E_1$. Cela signifie que l'amplitude du système composite a une forte probabilité d'être l'amplitude commune de l'équipement constitutif: c'est-à-dire l'opérateur de télécommunications constatera probablement aucune modification de l'amplitude des rayonnements lorsqu'il passera d'un élément d'équipement à trois éléments d'équipement.

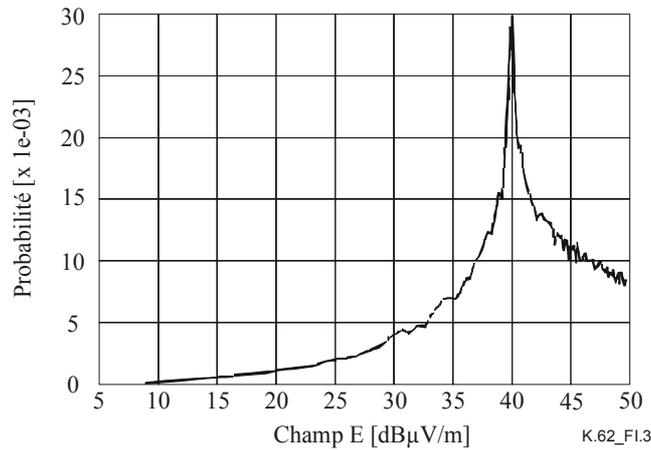


Figure I.3/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 3

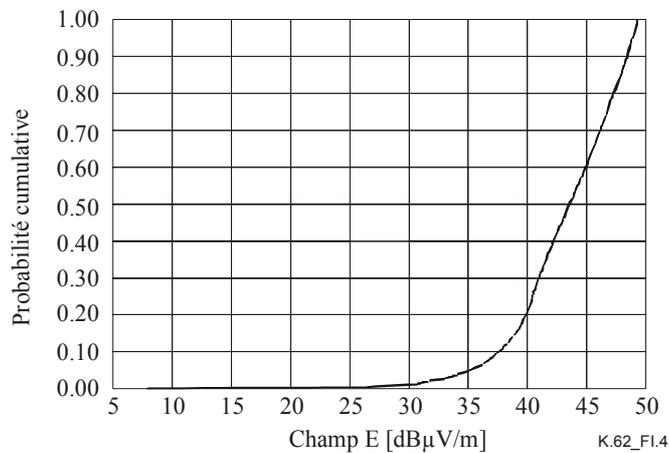


Figure I.4/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 3

I.3 N = 4

Lorsque le système contient quatre éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité et la densité de probabilité cumulative présentent aussi une forme distincte. Les Figures I.5 et I.6 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont les mêmes (dans ce cas $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = 40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$).

L'examen de ces Figures I.5 et I.6 montre que l'amplitude du niveau de rayonnement du système est compris entre la limite supérieure de $52 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ($40 \text{ dB}\mu\text{V/m} + 20 \log_{10}\{4\}$) et une limite inférieure nulle.

Dans la Figure I.5, on constate que la densité de probabilité présente un maximum pour une amplitude de rayonnement du système d'environ $46 \text{ dB}\mu\text{V/m}$. On notera que ce chiffre est inférieur de 6 dB environ au niveau limite supérieur.

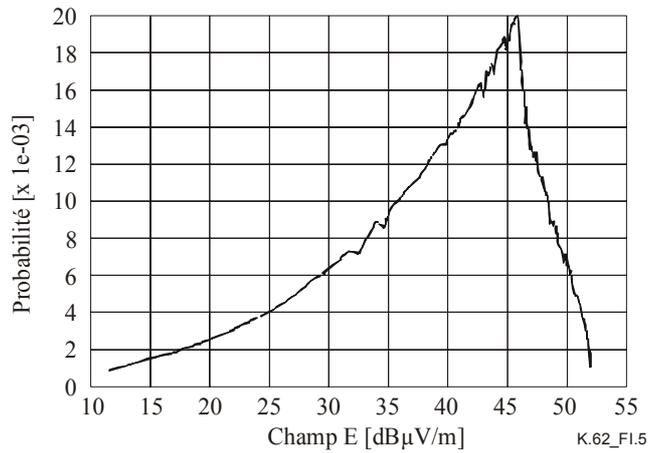


Figure I.5/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 4

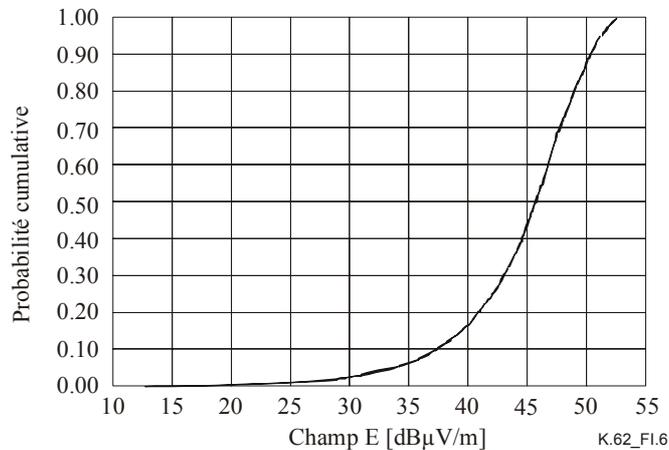


Figure I.6/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 4

I.4 N = 5

Lorsque le système contient cinq éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité et la densité de probabilité cumulative présentent aussi une forme distincte. Les Figures I.7 et I.8 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont les mêmes (dans ce cas $E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_5 = 40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$).

L'examen des Figures I.7 et I.8 montre que l'amplitude du niveau d'émission du système est compris entre la limite supérieure de $53,97 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ ($40 \text{ dB}\mu\text{V/m} + 20 \log_{10}\{5\}$) et une limite inférieure nulle.

Dans la Figure I.7, on constate que la densité de probabilité présente un maximum pour une amplitude de rayonnement du système d'environ $45 \text{ dB}\mu\text{V/m}$. On notera que ce chiffre est inférieur de 9 dB environ à la valeur correspondant au cas le plus défavorable.

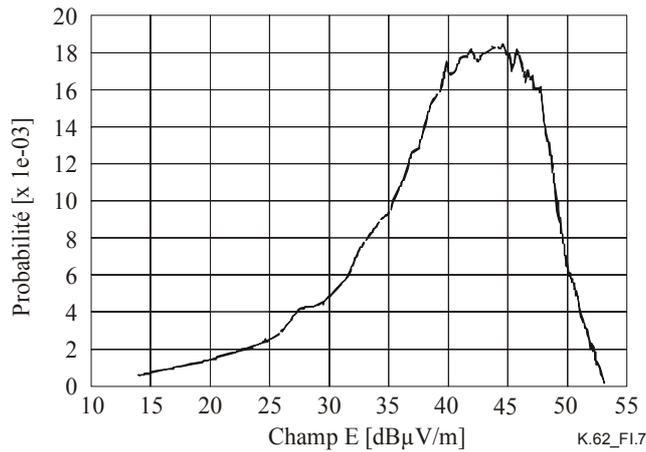


Figure I.7/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 5

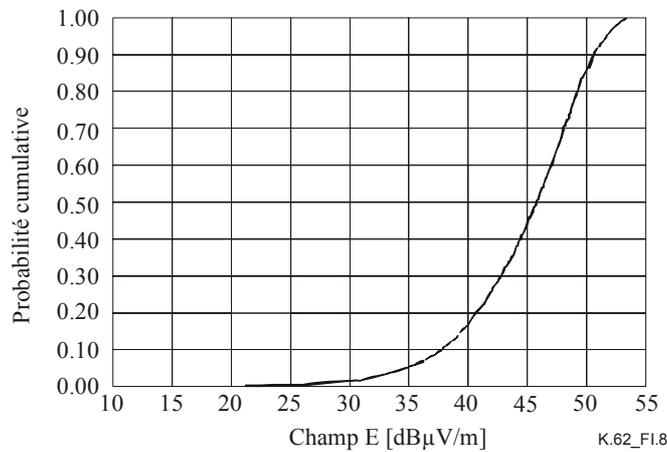


Figure I.8/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 5

I.5 N = 10

Lorsque le système contient dix éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité et la densité de probabilité cumulative présentent aussi une forme distincte. Les Figures I.9 et I.10 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont les mêmes (dans ce cas 40 dBµV/m).

L'examen des Figures I.9 et I.10 montre que l'amplitude du niveau d'émission du système est compris entre la limite supérieure de 60 dBµV/m ($40 \text{ dBµV/m} + 20 \log_{10}\{10\}$) et une limite inférieure nulle.

Dans la Figure I.9, on constate que la densité de probabilité présente un maximum pour une amplitude de rayonnement du système d'environ 48 dBµV/m. On notera que ce chiffre est inférieur de 12 dB environ à la valeur correspondant au cas le plus défavorable.

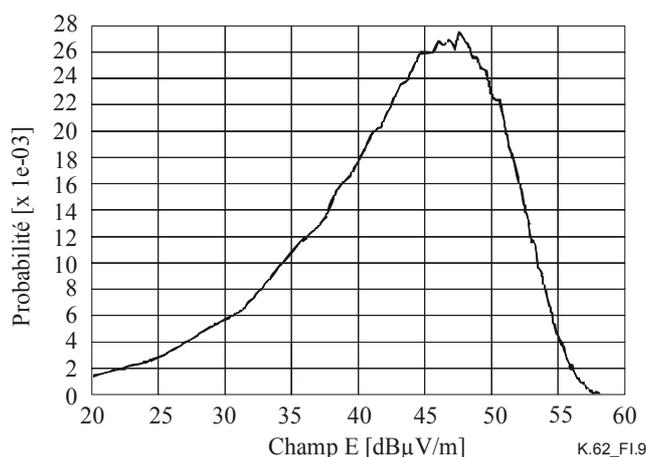


Figure I.9/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 10

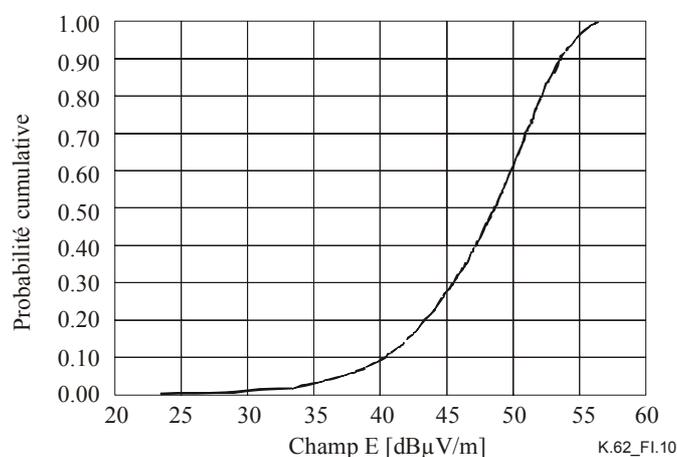


Figure I.10/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 10

I.6 N = 100

Lorsque le système contient cent éléments qui émettent sur une même fréquence, la densité de probabilité et la densité de probabilité cumulative présentent aussi une forme distincte. Les Figures I.11 et I.12 présentent des exemples correspondant au cas où les amplitudes des rayonnements sont les mêmes (dans ce cas 40 dB μ V/m).

L'examen des Figures I.11 et I.12 montre que l'amplitude du niveau d'émission du système est compris entre la limite supérieure de 80 dB μ V/m ($40 \text{ dB}\mu\text{V/m} + 20 \log_{10}\{100\}$) et une limite inférieure nulle.

Dans la Figure I.11, on constate que la densité de probabilité présente un maximum pour une amplitude de rayonnement du système d'environ 58 dB μ V/m. On notera que ce chiffre est inférieur de 22 dB environ à la valeur correspondant au cas le plus défavorable.

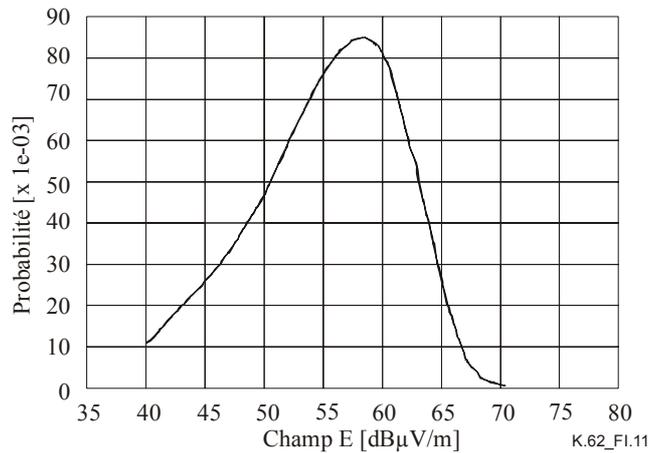


Figure I.11/K.62 – Exemple de distribution de probabilité pour N = 100

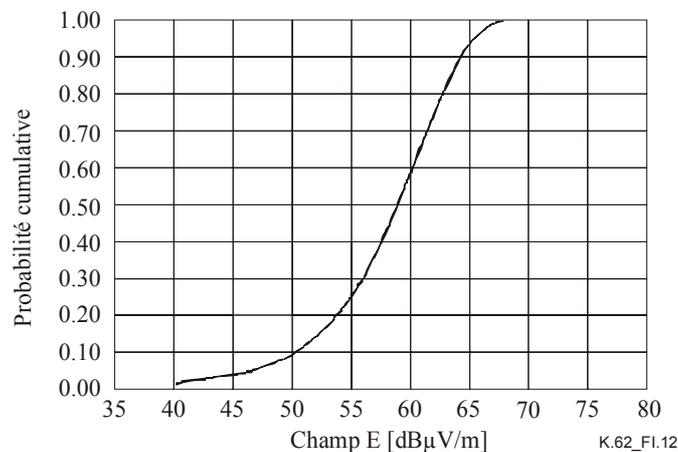


Figure I.12/K.62 – Exemple de distribution de probabilité cumulative pour N = 100

I.7 Analyse des distributions de probabilité

L'analyse des courbes de distribution de probabilité données dans les précédents exemples montre la tendance suivante: la probabilité d'atteindre le niveau limite supérieur décroît avec le nombre de rayonnements indépendants sur une fréquence commune.

Ainsi, par exemple:

- lorsque seuls deux termes de champ rayonné sont additionnés, la densité de probabilité atteint son maxima lorsque le niveau des rayonnements du système correspond pratiquement au cas le plus défavorable;
- lorsque dix termes de champ rayonné sont additionnés, la densité de probabilité atteint un minima lorsque l'amplitude des rayonnements du système s'approche du cas le plus défavorable. Dans l'exemple présenté, l'amplitude correspondant au cas le plus défavorable est 60 dBμV/m, mais la densité de probabilité atteint des valeurs presque nulles au-dessus de 58 dBμV/m;
- lorsque cent termes de champ rayonné sont additionnés, la densité de probabilité atteint le minima lorsque l'amplitude des émissions du système s'approche du cas le plus défavorable. Pour l'exemple présenté, l'amplitude correspondant au cas le plus défavorable est 80 dBμV/m, mais la densité de probabilité devient pratiquement nulle au-dessus de ~70 dBμV/m environ.

Par conséquent, la probabilité d'avoir une amplitude correspondant au cas le plus défavorable est faible et ne doit donc pas être utilisée comme base de vérification de la conformité du système.

Il faut ajouter qu'à mesure que le nombre de rayonnements indépendants sur une fréquence commune augmente, la marge entre le niveau de rayonnement du système qu'il est probable d'avoir et la limite supérieure pour le niveau d'émission du système augmente.

Ainsi, par exemple:

- lorsque seul deux termes de champ rayonné sont additionnés, la densité de probabilité atteint son maxima lorsque l'amplitude des rayonnements du système s'approche du cas le plus défavorable. Par conséquent, la marge entre les niveaux correspondant au cas le plus probable et au cas le plus défavorable est 0 dB;
- lorsque dix termes de champ rayonné sont ajoutés, la densité de probabilité atteint un maxima à ~ 48 dB μ V/m alors que la limite supérieure est de 60 dB μ V/m. Par conséquent la marge entre le cas le plus probable et la limite supérieure est de ~ 12 dB μ V environ;
- lorsque 100 termes de champ rayonné sont ajoutés, la densité de probabilité atteint un maxima à ~ 58 dB μ V/m alors que la limite supérieure est de 80 dB μ V/m. Par conséquent la marge entre le cas le plus probable et la limite supérieure est de ~ 22 dB μ V environ.

On peut trouver une explication intuitive à ce comportement. La limite supérieure du niveau de rayonnement du système est associée à une simple combinaison spécifique d'événements, à savoir que *tous* les termes de champs rayonnés se trouvent en phase au point d'évaluation. La probabilité d'apparition de cet événement singulier devient d'autant plus faible que le nombre de termes de champ rayonné à additionner est élevé. Pour d'autres amplitudes d'émission plus faibles, il y a en générale de nombreuses combinaisons différentes de valeurs de phase (c'est-à-dire de nombreux événements différents) parmi les termes de champs rayonnés qui produisent les amplitudes. Par conséquent, la probabilité d'occurrence de ces amplitudes est plus élevée.

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