

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Rapport UIT-R SM.2269
(06/2013)

Méthodes à utiliser pour établir une relation entre les rayonnements émis par les installations de communication par courants porteurs en ligne et la sortie des modems de communication par courants porteurs en ligne

Série SM
Gestion du spectre



Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Rapports UIT-R

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

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

Note: Ce Rapport UIT-R a été approuvé en anglais par la Commission d'études aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2014

© UIT 2014

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.

RAPPORT UIT-R SM.2269

Méthodes à utiliser pour établir une relation entre les rayonnements émis par les installations de communication par courants porteurs en ligne et la sortie des modems de communication par courants porteurs en ligne

(Question UIT-R 221-1/1)

(2013)

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
1 Introduction	1
2 Méthode de l'affaiblissement de couplage.....	2
3 Méthode des sources ponctuelles de rayonnement.....	10
4 Détermination expérimentale des courants RF dans les câbles électriques, des perturbations RF et des caractéristiques d'antenne équivalentes d'une installation CPL en intérieur.....	17

1 Introduction

Dans les études sur l'incidence des communications par courants porteurs en ligne (CPL) au-dessus de 80 MHz, il est essentiel d'élaborer des moyens permettant d'évaluer quelle part de l'énergie RF injectée dans les câbles électriques par les modems CPL est rayonnée. Ce type d'outils servira:

- à évaluer si les limites imposées aux rayonnements pour assurer la compatibilité électromagnétique (CEM) sont respectées;
- à déterminer l'augmentation résultante du bruit de fond; et
- à évaluer le risque que des brouillages soient causés aux services de radiocommunication.

S'il s'avère possible d'établir une relation entre les rayonnements émis par les installations CPL et les grandeurs directement mesurables que sont la densité spectrale de puissance et la puissance totale de sortie des modems CPL, il sera alors plus facile d'énoncer des lignes directrices relatives au déploiement du CPL dans le cadre de Recommandations de l'UIT-R et de l'UIT-T. La famille de Recommandations UIT-T G.9960 comporte un kit pratique qui permet aux régulateurs nationaux d'adapter le gabarit de densité spectrale de puissance (PSD) et la puissance totale de sortie en fonction de la situation du marché local. Ce qui manque, c'est un moyen permettant d'établir une relation entre, d'une part, les limites au-delà desquelles les niveaux de bruit et de brouillage radiofréquence sont inacceptables pour les services de radiocommunication et, d'autre part, la puissance de sortie et la PSD des modems CPL.

Pour pouvoir utiliser le niveau de PSD comme référence pour évaluer et contrôler les rayonnements des installations CPL, il est nécessaire de pouvoir déterminer les affaiblissements de couplage représentatifs dans des installations CPL types, ce qui permettrait ensuite d'établir une relation directe entre, d'une part, le niveau des rayonnements émis par les installations CPL types et, d'autre part, la PSD et la puissance totale de sortie des modems.

Plusieurs études de l'UIT-R sont décrites dans le Rapport UIT-R SM.2158, en particulier les techniques et les efforts déployés pour réaliser des mesures de l'incidence des rayonnements des systèmes CPL sur les systèmes de radiodiffusion fonctionnant au-dessous de 80 MHz. Les études suivantes faisant l'objet d'Appendices au Rapport UIT-R SM.2158 ont permis de mesurer les rayonnements CPL dans les bandes d'ondes décimétriques:

- Etude A3.1 (Brésil) – Rend compte de mesures du champ électrique rayonné par un seul système CPL de type *Access*. La conclusion est que, contrairement à la valeur mesurée de 60 dB(μ V/m), le champ brouilleur ne devrait pas dépasser 16 dB(μ V/m) au point de réception, ce qui peut être inférieur au bruit de fond.
- Etude A3.2 (NABA/CRC) – Rend compte de mesures du champ électrique rayonné par un système CPL de type *Indoor* et indique que le niveau de réception des signaux CPL est d'environ 50-60 dB(μ V/m) à une distance comprise entre 3 et 10 m.
- Etude A3.5.3 (IUCAF) – Rend compte de mesures du champ électrique rayonné par un système CPL dans une habitation isolée et indique que le niveau de réception des signaux CPL est d'environ 50 dB(μ V/m) à une distance de 10 m.

Le présent Rapport regroupe des études allant dans le sens de l'élaboration d'une méthode à utiliser pour établir une relation entre, d'une part, les rayonnements émis par les installations CPL et, d'autre part, la puissance de sortie et la PSD des modems.

2 Méthode de l'affaiblissement de couplage

Cette étude menée par Norddeutscher Rundfunk (NDR) et Zweites Deutsches Fernsehen (ZDF) vise à évaluer les rayonnements des installations CPL à partir des affaiblissements de couplage. L'objectif est d'élaborer une méthode permettant de déterminer la valeur de l'affaiblissement de couplage total dans une situation type, afin d'élargir la technique à diverses situations représentatives.

Cette étude fait suite aux mesures de brouillage dont il est question au § 3.2.1 afin d'examiner comment simplifier l'évaluation des rayonnements des installations CPL. De nombreuses étapes interviennent dans l'évaluation du bruit ou du brouillage supplémentaire produit au niveau d'un récepteur par les rayonnements des systèmes CPL. Malheureusement, la modélisation et la mesure ne sont faciles pour aucune des étapes. La grandeur qui peut être mesurée avec certitude et reproductibilité est la PSD injectée par un modem CPL dans les câbles électriques.

La tâche des administrations, des régulateurs et des organisations de normalisation serait plus simple si on pouvait utiliser le niveau de PSD injectée comme référence lors de la fixation des limites au-delà desquelles les niveaux de bruit et de brouillage sont inacceptables. Pour ce faire, il faudrait pouvoir évaluer les affaiblissements de couplage représentatifs dans des installations CPL types, ce qui permettrait ensuite d'établir une relation directe entre, d'une part, le niveau des rayonnements émis par les installations CPL types et, d'autre part, la PSD et la puissance totale de sortie des modems.

L'étude NDR/ZDF avait pour objet de modéliser les affaiblissements de couplage tout au long de la chaîne, à savoir sur la base de l'énergie RF injectée dans les câbles électriques, puis de la partie rayonnée, et enfin de la partie qui peut être reçue à l'intérieur d'un bâtiment. Si on peut déterminer un affaiblissement de couplage total représentatif sur la base de ces données, alors on peut évaluer le risque de brouillage des dispositifs CPL si on connaît leurs caractéristiques de puissance totale de sortie et de PSD.

Afin de garantir la reproductibilité de la modélisation, on utilise dans cette étude un modulateur DVB-T pour établir un signal RF large bande ayant des caractéristiques spectrales connues.

2.1 Principe de la mesure

Il est difficile de mesurer le niveau des rayonnements d'une installation CPL au moyen d'antennes, car la puissance injectée par les modems CPL dans les lignes électriques varie dans le temps. En mode repos, seuls certains pics de signal sont présents. La puissance maximale est émise uniquement pendant le transfert de données, qui est très aléatoire.

La puissance de sortie d'un modem CPL est connue du fabricant du dispositif. Le niveau de puissance de brouillage à la sortie d'une antenne de réception donnée peut être calculé, si on connaît l'affaiblissement de couplage entre le modem CPL branché à une prise de courant et la sortie de l'antenne. On peut aussi utiliser l'affaiblissement de couplage pour calculer la valeur maximale autorisée de la puissance de sortie ou de la PSD d'un modem CPL, si le niveau de brouillage maximal à l'entrée du récepteur est donné.

Mesurer comme il convient l'affaiblissement de couplage prend beaucoup de temps, car il faut prendre en considération différents types de bâtiments, de câblages électriques, différentes positions d'antenne, etc. Une approche plus efficace consiste à modéliser plusieurs types de bâtiments, avec différents câblages électriques, à brancher électriquement un modem CPL en différents endroits et à utiliser des outils de calcul des rayonnements électromagnétiques, afin de déterminer l'affaiblissement de couplage entre le modem CPL et le niveau de signal reçu par une antenne dans le bâtiment. L'antenne doit être placée en différents endroits et dans des positions différentes. On peut calculer un grand nombre de valeurs d'affaiblissement de couplage, pour différents modèles de câblage et différentes hypothèses, ce qui permet de générer un bon modèle statistique. Les valeurs peuvent être vérifiées par des mesures représentatives.

Afin de déterminer certaines valeurs expérimentales de l'affaiblissement de couplage dans la bande d'ondes métriques, des mesures ont été réalisées par l'IRT¹ dans un laboratoire et dans une maison mitoyenne type d'une région rurale allemande.

2.2 Montage de mesure

Les premières mesures de l'affaiblissement de couplage ont été réalisées dans un laboratoire de l'IRT juste pour se faire une première idée. Un laboratoire n'est toutefois pas représentatif d'un site de réception de radiodiffusion. Des mesures réalistes de l'affaiblissement de couplage ont été réalisées dans une maison mitoyenne type d'une région rurale allemande. C'est une maison en briques, comportant un rez-de-chaussée et deux étages, dont les planchers/plafonds sont en béton; voir la Fig. 1.

¹ L'IRT (Institut für Rundfunktechnik GmbH) est l'institut de recherche et développement des radiodiffuseurs publics de l'Allemagne, de l'Autriche et de la Suisse. Il est basé à Munich (Allemagne).

FIGURE 1

Maison mitoyenne (au centre) dans laquelle l'affaiblissement de couplage entre un modem CPL et une antenne doublet a été mesuré



Report SM.2269-01

Pour mesurer la puissance de brouillage rayonnée et reçue, un signal stable de niveau connu doit être injecté dans le câblage électrique. La sortie d'un modem CPL ne convient pas directement car elle est aléatoire. Etant donné que les systèmes CPL utilisent des signaux COFDM pour la transmission de données, un signal analogue a été utilisé pour les mesures, à savoir un signal DVB-T. Un générateur de signal SFQ de Rohde & Schwarz (R&S) a injecté un signal DVB-T d'une largeur de bande de 7 MHz à une fréquence de 198,5 MHz dans le câblage électrique de la maison; voir la Fig. 2.

FIGURE 2

Générateur de signal SFQ injectant un signal DVB-T dans le câblage électrique

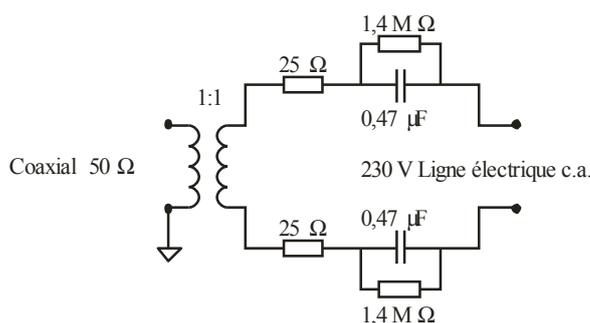


Report SM2269-02

L'adaptation entre la sortie coaxiale du générateur de 50 Ohms et les lignes électriques symétriques ainsi que l'isolement 230 V ont été réalisés à l'aide du circuit illustré dans la Fig. 3.

FIGURE 3

Circuit d'adaptation et d'isolement



Report SM.2269-03

Le circuit affaiblit considérablement le signal du générateur, si l'impédance de ligne est inférieure à 1 000 Ohms (à savoir 3,5 dB à 100 Ohms). L'impédance de ligne dépend de plusieurs paramètres sur lesquels on ne peut agir. Aux fins des calculs associés ici, on considère que le circuit d'adaptation affaiblit le signal DVB-T de 3 dB.

Une antenne plan à polarisation verticale a été utilisée pour la réception du signal; voir la Fig. 4. L'antenne a été placée à 1,5 m au-dessus du sol et a été raccordée à un analyseur de spectre afin de mesurer la puissance reçue dans le canal. Le gain de l'antenne plan a une valeur de 0 dB_d, identique à celle du gain d'un doublet demi-onde.

FIGURE 4

Antenne plan à polarisation verticale utilisée pour les mesures



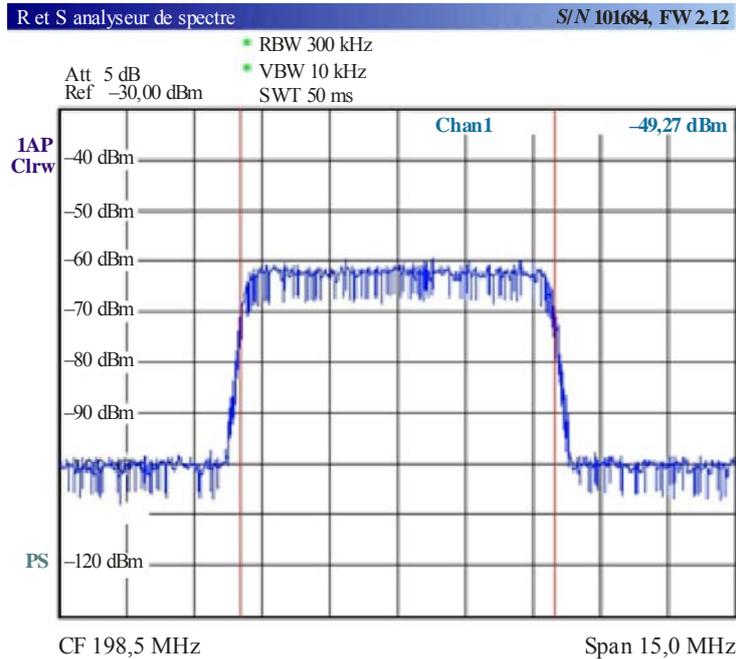
Report SM2269-04

L'analyseur de spectre utilisé était un analyseur de spectre ETL R&S, qui peut mesurer la puissance dans une largeur de bande donnée. Pour l'étalonnage du montage de mesure, le générateur de signal SFQ a été réglé à un niveau de puissance de -50 dBm et a été raccordé directement à l'analyseur de spectre ETL réglé pour effectuer des mesures dans une largeur de bande de canal de 7 MHz. Le spectre mesuré est illustré dans la Fig. 5, laquelle indique que la puissance mesurée dans le canal était de -49,27 dBm. Autrement dit, l'erreur de mesure était inférieure à 1 dB.

Les réglages de l'analyseur de spectre ont été conservés pour toutes les mesures suivantes.

FIGURE 5

**Spectre du signal DVB-T utilisé pour les mesures
(-50 dBm au niveau du générateur)**



Report SM2269-05

2.3 Résultats de mesure

2.3.1 Résultats de mesure dans le laboratoire de l'IRT

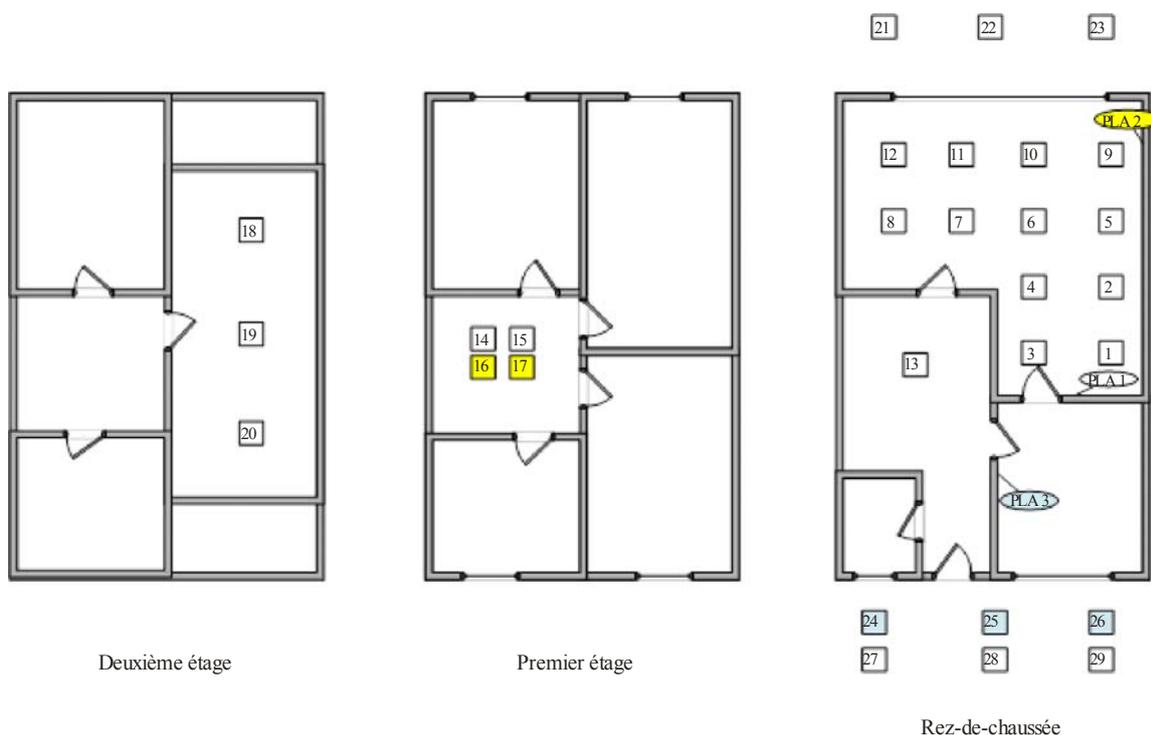
Le générateur de signal DVB-T a été branché à une prise électrique. La puissance du signal à la sortie de l'antenne plan, placée à 1,5 m au-dessus du sol, a été mesurée en six endroits dans le laboratoire.

2.3.2 Résultats de mesure dans une maison mitoyenne

La maison dans laquelle les mesures ont été réalisées est une maison en briques, comportant un rez-de-chaussée et deux étages, dont les planchers/plafonds sont en béton; voir la Fig. 1. En réalité, il y a trois maisons adjacentes, une à gauche, une au centre et une à droite. Le plan de la maison centrale est donné dans la Fig. 6, celui de la maison adjacente de gauche dans la Fig. 7. Le signal de mesure a été injecté dans une prise électrique de la maison centrale, au rez-de-chaussée.

FIGURE 6

Plan de la maison centrale

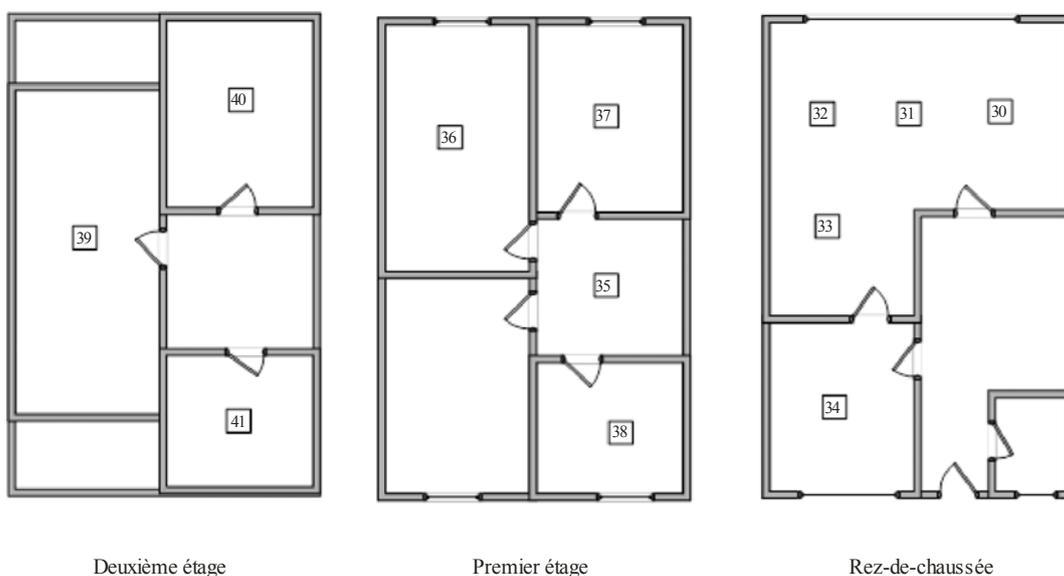


Report SM.2269-06

Le générateur DVB-T a été réglé sur une puissance de sortie de 0 dBm et a été branché successivement aux prises de courant situées aux positions de modem CPL 1 (blanc), 2 (jaune) et 3 (bleu) au rez-de-chaussée. Les mesures ont été réalisées aux points 1 à 29 de la maison centrale et aux points 30 à 41 de la maison adjacente de gauche. La couleur du point de mesure correspond à un couplage avec le générateur, lorsqu'il a été mesuré (modem CPL 1, 2 ou 3).

FIGURE 7

Plan de la maison adjacente de gauche



Report SM.2269-07

–	dans la pièce voisine	44 dB
–	à l'étage au-dessus	54 dB
–	deux étages au-dessus	57 dB
–	en extérieur à une distance de 4 m	57 dB
–	en extérieur à une distance de 10 m	60 dB

2.4.3 Résultats de mesure dans la maison adjacente

L'affaiblissement de couplage entre la sortie PLA 1 dans la maison centrale et la sortie de l'antenne de réception dans la maison adjacente de gauche varie entre 62 dB et 70 dB, en fonction de la distance et de l'étage. Les valeurs moyennes qui ont été mesurées sont les suivantes:

–	au rez-de-chaussée	62 dB
–	à l'étage au-dessus	62 dB
–	deux étages au-dessus	70 dB

2.5 Exemple de calcul de la puissance maximale autorisée à la sortie d'un modem CPL

Pour calculer la puissance maximale autorisée à la sortie d'un modem CPL afin d'éviter de brouiller la réception DAB, on part des hypothèses suivantes:

- le brouillage de la réception DAB à 200 MHz ne devrait pas faire augmenter de plus de 1% la puissance de bruit de réception totale;
- la puissance émise par l'installation CPL est uniformément répartie entre 30 MHz et 300 MHz;
- le facteur de bruit (F) du récepteur DAB est de 8 dB;
- le gain de l'antenne de réception DAB est de $-2,2$ dBd;
- la marge pour le bruit artificiel (MMN) à 200 MHz avec l'antenne mentionnée ci-dessus est de 2 dB;
- la réception DAB a lieu dans un appartement adjacent, dans lequel l'affaiblissement de couplage est de 62 dB.

Le signal COFDM du modem CPL entraîne une perturbation de type bruit blanc. Si le niveau de brouillage initial ne doit pas augmenter de plus de 1%, la puissance de brouillage du modem CPL devrait être inférieure de 20 dB au niveau de bruit de réception total équivalent à l'entrée du récepteur.

Le niveau de bruit équivalent à l'entrée du récepteur est le niveau de bruit thermique auquel s'ajoutent le facteur de bruit du récepteur et la marge pour le bruit artificiel reçu par l'antenne. Le résultat ne dépend pas de la largeur de bande du signal si on utilise la PSD au lieu de la puissance.

La PSD du bruit thermique à 20°C est de -174 dBm/Hz. Après l'ajout de F et de MMN, la PSD du bruit de fond à l'entrée du récepteur est de -164 dBm/Hz.

Le brouillage CPL devrait être inférieur d'au moins 20 dB, soit -184 dBm/Hz.

L'affaiblissement de couplage entre un modem CPL et une antenne doublet est supposé être de 62 dB. L'antenne de réception DAB a un gain de $-2,2$ dB par rapport à une antenne doublet, de sorte que l'affaiblissement de couplage total entre le modem CPL et le récepteur DAB est de $64,2$ dB. Si on ajoute l'affaiblissement de couplage à la PSD du bruit de fond, on en déduit que la PSD à la sortie du modem CPL devrait être inférieure à $-119,8$ dBm/Hz.

Par conséquent, la puissance totale de sortie entre 30 MHz et 300 MHz ne devrait pas dépasser $-35,5$ dBm.

2.6 Conclusions

On peut calculer la puissance de brouillage à l'entrée d'un récepteur à partir de la PSD à la sortie d'un modem CPL, si on connaît l'affaiblissement de couplage entre la sortie du modem CPL et la sortie de l'antenne du récepteur. Inversement, si on règle l'entrée du récepteur au niveau de brouillage maximal autorisé, on peut calculer la PSD maximale admissible du signal à la sortie du modem CPL à partir de l'affaiblissement de couplage.

L'affaiblissement de couplage entre un modem CPL raccordé à une prise de courant et la sortie d'une antenne doublet à polarisation verticale dans la bande d'ondes métriques a été mesuré dans un laboratoire et dans une maison mitoyenne type d'une région rurale allemande. Les valeurs qui ont été mesurées sont comprises entre 48 dB et 57 dB à l'intérieur de la maison et entre 62 dB et 70 dB dans la maison adjacente.

Compte tenu des résultats de mesure, si la puissance de brouillage dans un appartement adjacent ne doit pas faire augmenter de plus de 1% la puissance de bruit totale du système de réception pour la réception DAB dans la bande d'ondes métriques, la PSD maximale du signal à la sortie d'un modem CPL ne devrait pas dépasser -120 dBm/Hz.

Les valeurs mesurées de l'affaiblissement de couplage et le niveau maximal calculé de la PSD du signal à la sortie d'un modem CPL sont valables pour des habitations analogues à celles dans lesquelles les mesures ont été réalisées et ayant un câblage électrique analogue. Pour d'autres types d'habitation et d'autres câblages électriques, les valeurs peuvent être nettement différentes.

3 Méthode des sources ponctuelles de rayonnement

Dans la présente section, on examine l'incidence du CPL sur les communications cellulaires mobiles dans la bande 450-470 MHz. Le comportement complexe des câbles électriques en tant que source de rayonnement répartie a posé problème dans toutes les évaluations expérimentales et théoriques de l'incidence du CPL aux fréquences inférieures à environ 250 MHz. Toutefois, à certaines fréquences, un modem CPL raccordé à un câblage se comportera davantage comme une source ponctuelle.

L'effet Kelvin fait que l'affaiblissement le long du câblage augmente avec la fréquence. Par conséquent, plus la fréquence de fonctionnement est élevée, plus les rayonnements se limitent à un court tronçon de câblage à proximité du point d'injection, auquel cas le problème des rayonnements CPL est celui de différents modems CPL rayonnant en tant que sources ponctuelles sur un court tronçon de câblage à partir de chaque point de raccordement. Ainsi, les communications sur le câblage électrique seront peut-être plus affectées par le rayonnement et la réception à chaque point de raccordement que par les signaux CPL affaiblis transmis sur toute la longueur du câblage électrique.

On dispose d'aucune information sur la question de savoir quand une telle transition de comportement a lieu le long d'un câblage électrique type, mais à l'évidence l'utilisation d'un simple modèle de source ponctuelle pour l'évaluation des affaiblissements de couplage liés aux rayonnements CPL sera d'autant plus appropriée que la fréquence sera élevée.

3.1 Méthode et calculs à utiliser pour la protection des services mobiles cellulaires

Les Recommandations UIT-R M.1767 et UIT-R F.1670 ont été citées en référence dans l'Accord régional GE06 afin d'assurer la protection des services mobiles et fixes vis-à-vis de la télévision numérique. La méthode de calcul présentée au § 3.2 ci-après repose sur la même méthode et fournit les seuils de brouillage et les gabarits des rayonnements CPL.

Compte tenu des distances (CPL – récepteur brouillé; voir les distances indiquées entre parenthèses à la troisième ligne du Tableau 1) et des hypothèses spécifiées précédemment, on peut en déduire les valeurs suivantes de seuils et de puissance de crête CPL maximale autorisée:

TABLEAU 1
**Seuils et puissance de crête CPL maximale pour différents récepteurs brouillés
entre 80 et 470 MHz**

Puissance et champ dans 1 MHz	En intérieur Terminal cellulaire ou station de base domestique	En extérieur Station fixe et station de base macrocellulaire/ micro-cellulaire	En extérieur Station de radiolocalisation
Seuil de puissance (dBm)	-129	-141	-149
Seuil de champ (dB μ V/m)	1,5	-10,5	-18,5
Puissance de crête CPL maximale (dBm)	-103 (1 m)	-95 (10 m)	-83 (100 m)

Cette analyse du brouillage causé par les rayonnements CPL à la réception de l'un des services de Terre couramment utilisés chez les particuliers pourrait aussi être utilisée pour assurer la protection des services de radiodiffusion dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques. De plus, cette méthode peut aussi s'avérer utile pour l'étude de la protection des services de radiocommunication contre les rayonnements non désirés des dispositifs industriels, scientifiques et médicaux (ISM) et des installations de distribution de la télévision par câble.

La baisse de sensibilité tolérée des récepteurs des services de Terre est de 0,05 dB; le signal brouilleur autorisé est inférieur de 20 dB au seuil de bruit; le seuil vaut KTB μ F -20 dB. Si la baisse de sensibilité tolérée des récepteurs des services de Terre est de 0,5 dB, le signal brouilleur autorisé est inférieur de 10 dB au seuil de bruit, et toutes les valeurs du Tableau 1 seront supérieures de 10 dB.

Le cas le plus défavorable de protection des services de Terre en intérieur vis-à-vis du CPL correspond à un téléphone cellulaire situé à 1 m du CPL. Pour protéger correctement les faibles signaux des services de Terre dans les bandes d'ondes métriques/décimétriques, les rayonnements des dispositifs ou installations CPL ne devraient pas dépasser une valeur maximale de 1,5 dB μ V/m dans une largeur de bande de 1 MHz, pour une mesure réalisée en intérieur à une distance de 1 m de l'installation CPL; voir les autres valeurs dans le Tableau 1. Le champ est indépendant de la fréquence, dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre et de l'absence d'affaiblissement dû aux murs. La puissance dépend de la fréquence radioélectrique; à une fréquence radioélectrique de 460 MHz, la puissance de crête CPL maximale autorisée est de -103 dBm/MHz. Pour une dégradation de la marge de protection contre les évanouissements de 0,5 dB (et non pas 0,05 dB), la valeur est de 11,5 dB μ V/m dans une largeur de bande de 1 MHz, pour une mesure réalisée en intérieur à une distance de 1 m de l'installation CPL; et à une fréquence radioélectrique de 460 MHz, la puissance de crête CPL autorisée est de -93 dBm/MHz.

Le cas le plus défavorable de protection des services de Terre en extérieur vis-à-vis du CPL correspond à une station fixe ou à une station de base cellulaire située à 10 m du CPL. Dans ce cas, la puissance de crête CPL maximale est de -95 dBm/MHz pour une dégradation de la marge de protection contre les évanouissements de 0,05 dB et de -85 dBm/MHz pour une dégradation de la marge de protection contre les évanouissements de 0,5 dB.

3.2 Méthode de calcul à utiliser pour évaluer les rayonnements émis par les systèmes CPL

Pour calculer les seuils de puissance et de champ à utiliser lors de l'évaluation de la vulnérabilité des systèmes de radiocommunication aux brouillages, lesdits systèmes peuvent être caractérisés par leur facteur de bruit et les paramètres G_i et L_F . Il est à noter que le gabarit des rayonnements CPL admissibles dépend de la fréquence du signal utile, R_F , étant donné que la propagation varie en fonction de la fréquence.

Les paramètres suivants sont employés dans les calculs:

- F : facteur de bruit du récepteur de la station mobile de Terre (dB);
- B : largeur de bande de référence du système brouilleur CPL (MHz);
- g_i : gain d'antenne du récepteur de la station de Terre (téléphone ou station de base) (valeur numérique);
- G_i : gain d'antenne du récepteur de la station cellulaire (téléphone ou station de base) (dBi);
- L_F : affaiblissement dans le câble d'alimentation de l'antenne (dB);
- f : fréquence de référence (MHz);
- $P_{handset}$: seuil de puissance/MHz pour le téléphone cellulaire (dBm);
- P_{BS} : seuil de puissance/MHz pour la station de base de Terre (dBm);
- P_{RL} : seuil de puissance/MHz pour la station de radiolocalisation (dBm);
- $E_{handset}$: seuil de champ/MHz pour le téléphone cellulaire (dB μ V/m);
- E_{BS} : seuil de champ/MHz pour la station de base de Terre (dB μ V/m).

3.2.1 Seuils à utiliser pour la protection des services de Terre contre les rayonnements CPL

La puissance de bruit thermique d'un récepteur $KTBF^2$ pour une antenne isotrope sans perte dans une largeur de bande de 1 MHz et pour un facteur de bruit type (F) de 5 dB est donnée par:

$$KTBF/1 \text{ MHz} = -114 + 5 = -109 \text{ dBm/MHz} \quad (1)$$

$$KTBF - 20 \text{ dB (1 MHz)} = -109 \text{ dBm} - 20 \text{ dB} = -129 \text{ dBm/MHz} \quad (2)$$

Etant donné qu'aucun gain d'antenne n'est applicable aux téléphones, le critère de protection des téléphones cellulaires est que les rayonnements CPL pour un signal de référence dans une largeur de bande de 1 MHz ne devraient pas dépasser:

$$P_{handset} (1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} \quad (3)$$

Pour les stations de base de réseau cellulaire, on peut utiliser les paramètres $G_i = 15$ dBi et $L_F = 3$ dB pour déterminer les critères de protection contre les rayonnements CPL. Le seuil de puissance à l'entrée de l'antenne de la station de base est alors donné par:

$$P_{BS} (1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} - 15 \text{ dB} (G_i) + 3 \text{ dB} (L_F) = -141 \text{ dBm/MHz} \quad (4)$$

2 Pour k (constante de Boltzmann) de $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, $T \sim 300$ Kelvins et $B = 1$ MHz, le facteur $KTBF$ est égal à -114 dBm.

A titre de comparaison, pour un récepteur de radiolocalisation, on peut utiliser les paramètres $G_i = 23$ dBi et $L_F = 3$ dB pour déterminer les critères de protection contre les rayonnements CPL. Le seuil de puissance à l'entrée de l'antenne de la station de radiolocalisation est alors donné par:

$$P_{RL} (1 \text{ MHz}) = -129 \text{ dBm/MHz} - 20 \text{ dB} = -149 \text{ dBm/MHz} \quad (5)$$

Si on utilise la formule standard:

$$P_r = \frac{E^2 g \lambda^2}{Z_0 4\pi} = \frac{E^2 g c^2}{480\pi^2 f^2}$$

la formule donnant la puissance (dBm) en fonction du champ électrique (dB μ V/m) à l'entrée de l'antenne est la suivante:

$$P (\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 77,21 - 20 \log f (\text{MHz}) + G_i - L_F \quad (6)$$

Pour un même niveau de bruit équivalent à l'entrée du récepteur (à savoir compte tenu du facteur de bruit, de la largeur de bande de référence de 1 MHz et de la fréquence R_F de 460 MHz), la différence de champ tient aux valeurs différentes de gain et d'affaiblissement pour l'antenne de réception.

Pour la fréquence de référence R_F de 460 MHz, la formule (6) devient:

$$-129 (\text{dBm}) = E(\text{dB}\mu\text{V/m}) - 77,21 - 53,25 \quad (7)$$

Par conséquent:

$$E_{handset} (1 \text{ MHz}) = 1,5 (\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (8)$$

$$E_{BS} (1 \text{ MHz}) = E_{fixed} (1 \text{ MHz}) = 1,5 (\text{dB}\mu\text{V/m}) - 12 \text{ dB} = -10,5 (\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (9)$$

$$E_{RL} (1 \text{ MHz}) = E = 1,5 (\text{dB}\mu\text{V/m}) - 20 \text{ dB} = -18,5 (\text{dB}\mu\text{V/m}) \quad (10)$$

3.2.2 Gabarit des niveaux de rayonnement CPL autorisés pour assurer la protection des services de Terre

Dans l'hypothèse d'une propagation en espace libre des rayonnements CPL, considérés comme une source ponctuelle, vers les récepteurs de radiocommunication de Terre, la formule (4) de la Recommandation UIT-R P.525 avec la distance d en mètres (et non pas en km) s'écrit:

$$L_{bf} = -27,6 + 20 \log f + 20 \log d (\text{dB}) \quad (11)$$

La puissance de crête CPL maximale autorisée P_{PLT} pour $f = 460$ MHz pour assurer la protection d'un téléphone cellulaire situé à 1 m d'une source CPL vaut alors:

$$\begin{aligned} P_{PLT} (\text{dBm/MHz}) &= P_{handset} (\text{dBm/MHz}) + L_{bf} = -129 - 27,6 + 20 \log f + 20 \log d \\ &= -129 - 27,6 + 20 \log 460 + 20 \log 1 = -129 - 27,6 + 53,3 \approx -103 (\text{dBm/MHz}) \end{aligned} \quad (12)$$

De même, la puissance de crête CPL maximale autorisée P_{PLT} pour $f = 460$ MHz pour assurer la protection d'une station de base IMT/cellulaire située à une distance de 10 m d'une source CPL vaut:

$$\begin{aligned} P_{PLT} \text{ (dBm/MHz)} &= P_{BS} \text{ (dBm/MHz)} + L_{bf} \\ &= -141 - 27,6 + 53,3 + 20 \log 10 \approx -95 \text{ (dBm/MHz)} \end{aligned} \quad (13)$$

Enfin, la puissance de crête CPL maximale autorisée P_{PLT} pour $f = 460$ MHz pour assurer la protection d'un récepteur de radiolocalisation situé à une distance de 100 m d'une source CPL vaut:

$$\begin{aligned} P_{PLT} \text{ (dBm/MHz)} &= P_{RL} \text{ (dBm/MHz)} + L_{bf} \\ &= -149 - 27,6 + 53,3 + 20 \log 100 \approx -83 \text{ (dBm/MHz)} \end{aligned} \quad (14)$$

3.3 Méthode de calcul à utiliser pour évaluer les rayonnements cumulatifs émis par les installations CPL

Le présent paragraphe porte sur l'évaluation des rayonnements cumulatifs émis par les installations CPL lorsque plusieurs modems CPL sont actifs simultanément. Etant donné que les installations CPL sont constituées d'un certain nombre de modems CPL qui émettent à une fréquence commune, la superposition de ces différents rayonnements des installations CPL risque de causer des brouillages préjudiciables aux services de radiocommunication. A cet égard, les différents rayonnements des modems CPL ont des phases différentes variant aléatoirement à une distance de mesure spécifique. Du fait de cette variation aléatoire, des interférences constructives et destructives se produisent de manière stochastique au niveau d'un récepteur brouillé.

Même si la puissance émise par plusieurs modems CPL est la même, les rayonnements de ces modems CPL peuvent être différents à une distance donnée en fonction de l'environnement des installations CPL. Ainsi, il convient de prendre en considération le champ pour évaluer l'incidence des installations CPL sur les services de radiocommunication. Dans un grand nombre de pays, les rayonnements des systèmes CPL sont également autorisés dans une certaine plage de champ électrique comme illustré dans la Recommandation UIT-R SM.1879. Pour évaluer le champ électrique des rayonnements cumulatifs des installations CPL, on applique l'approche probabiliste présentée dans la Recommandation UIT-T K.62 en prenant en considération les variations du champ électrique causées par les différences de phase aléatoires des différents signaux brouilleurs au niveau d'un récepteur brouillé. Le présent paragraphe décrit donc une méthode de calcul à utiliser pour évaluer les rayonnements cumulatifs émis par les installations CPL d'un point de vue probabiliste.

3.3.1 Modèle mathématique

Considérons que des installations CPL constituées de plusieurs modems CPL émettent des rayonnements autour d'un récepteur brouillé, comme illustré dans la Fig. 9. Dans cette figure, r_i est la distance entre la i ème source CPL et le point de mesure, et d_i est la distance entre la i ème source CPL et le récepteur brouillé. L'amplitude des rayonnements cumulatifs des installations CPL au niveau du récepteur brouillé peut s'écrire mathématiquement comme suit:

$$E_o(t) = \sum_{i=1}^N E_{oi} \cos(\omega_c t + \theta_i) = E_o \cos(\omega_c t + \alpha) \quad (15)$$

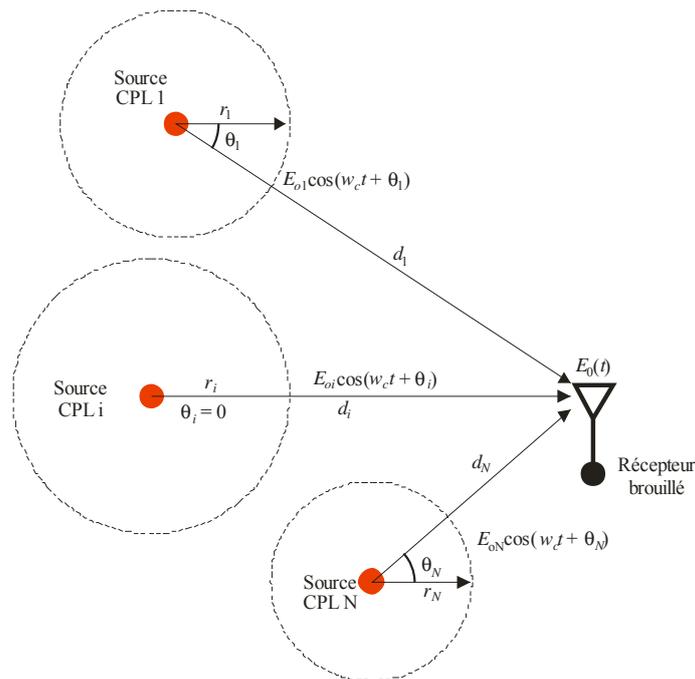
où

- E_o : amplitude des rayonnements cumulatifs au niveau du récepteur brouillé ($\mu\text{V/m}$)
- N : nombre de sources CPL
- E_{oi} : amplitude des rayonnements de la i ème source CPL à la distance de mesure ($\mu\text{V/m}$)
- ω_c : fréquence angulaire (Hz)
- θ_i : différence de phase entre les rayonnements de la i ème source CPL et une référence convenue au niveau du récepteur brouillé (radians)
- α : différence de phase entre les rayonnements cumulatifs et une référence convenue au niveau du récepteur brouillé (radians).

L'objectif du présent paragraphe est de calculer la probabilité de brouillage $\{E_o > E_{PR}\}$, à savoir la probabilité que l'amplitude des rayonnements cumulatifs des installations CPL, E_o , soit supérieure au niveau requis pour assurer la protection du récepteur brouillé, E_{PR} .

FIGURE 9

Configuration géométrique des rayonnements cumulatifs des installations CPL au niveau d'un récepteur brouillé



Report SM.2269-09

Pour calculer la probabilité de brouillage, $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, θ_i est modélisé statistiquement par la variable aléatoire uniforme ayant la fonction de densité de probabilité $1/2\pi$ sur $[-\pi, \pi]$, comme dans la Recommandation UIT-T K.62. Si on utilise la simple propagation en champ lointain, on calcule comme suit la valeur logarithmique en dB $\mu\text{V/m}$ de l'amplitude des rayonnements de la i ème source CPL à la distance d_i :

$$E_{oi}^{dB}(d_i) = E_{oi}^{dB}(r_i) - 20 \cdot \beta \cdot \log_{10}(d_i/r_i) \quad (16)$$

où $E_{oi}^{dB}(r_i)$ est la valeur logarithmique en dB μ V/m de l'amplitude des rayonnements $E_{oi}(r_i)$ à la distance r_i et β est le coefficient de propagation de l'onde. Dans le cas de la propagation en espace libre, β vaut 1. On obtient l'amplitude des rayonnements cumulatifs des installations CPL au niveau du récepteur brouillé, E_o , en utilisant la formule (3) de la Recommandation UIT-T K.62:

$$E_o = \sqrt{\sum_{i=1}^N E_{oi}^2(d_i) + 2 \sum_{j>i}^N \sum_{i=1}^N E_{oi}(d_i)E_{oj}(d_j) \cos(\theta_i - \theta_j)}, i < j \leq N \quad (17)$$

Ainsi, pour calculer la probabilité de brouillage, $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, on utilise la formule (17), la variable aléatoire uniforme θ_i ; $i = 1, \dots, N$ étant générée de manière aléatoire.

3.3.2 Exemple

A titre d'exemple de calcul de $P_r\{E_o > E_{PR}\}$, on considère comme récepteur susceptible d'être brouillé par une installation CPL, une station de base en extérieur ayant un niveau de protection $E_{PR} = 0,3 \mu\text{V/m}$ ($= -10,5 \text{ dB}\mu\text{V/m}$). Le niveau de protection est égal à la valeur obtenue au § 3.1.1 précédent. Les paramètres de l'installation CPL sont décrits dans le Tableau 2.

TABLEAU 2
Description des paramètres

Paramètres	Valeur	Remarques
Nombre de sources CPL (N)	5	Environnement supposé de l'installation CPL
Champ émanant des sources CPL à une distance de mesure de 10 m ($(E_{oi}^{dB}(r_i))$)	37 dB μ V/m*	Cinq sources CPL dont les rayonnements ont la même amplitude
Fréquence commune	460 MHz	Voir la formule (9)
Coefficient de propagation de l'onde (β)	2	Pas en visibilité directe
Distances entre les sources CPL et le récepteur brouillé (d_i)	100, 150, 200, 250 et 300 m	Environnement supposé de l'installation CPL

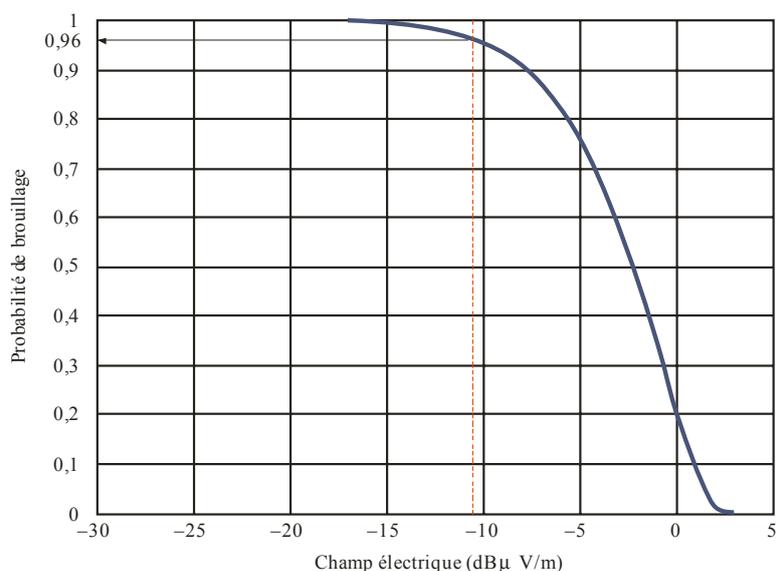
* La valeur correspond à la limite des rayonnements des équipements utilisant les technologies de l'information de classe B, comme décrit dans la Publication 22 du Comité international spécial des perturbations radioélectriques (CISPR).

Comme illustré dans la Fig. 10, la probabilité de brouillage d'une station de base en présence d'une installation CPL, $P_r\{E_o > 0,3 \mu\text{V/m}$ ($= -10,5 \text{ dB}\mu\text{V/m}$)}, est d'environ 0,96. Si on compare la probabilité de 0,96 de brouillage du récepteur avec le niveau de confiance de 80% du CISPR, $P_r\{E_o > E_{PR}\} = 0,2$ ou $P_r\{E_o < E_{PR}\} = 0,8$, on en conclut que l'installation CPL décrite dans le Tableau 2 brouille la station de base en extérieur ayant un niveau de protection de $-10,5 \text{ dB}\mu\text{V/m}$.

L'exemple montre que la méthode de calcul présentée peut être appliquée pour évaluer les rayonnements cumulatifs des installations CPL.

FIGURE 10

Probabilité de brouillage d'une station de base en présence d'installations CPL



Report SM2269-10

4 Détermination expérimentale des courants RF dans les câbles électriques, des perturbations RF et des caractéristiques d'antenne équivalentes d'une installation CPL en intérieur

Mesure des perturbations RF, courants en mode commun (CM) et en mode différentiel (DM) causés par les systèmes CPL, et caractéristiques d'antenne d'un réseau CPL en intérieur

D'après le Chapitre 2 du Rapport UIT-R SM.2158, les effets d'antenne des câblages électriques rayonnants et les effets d'écran des bâtiments sont complexes et varient d'un logement à l'autre et selon les pays, en fonction des pratiques locales de construction des bâtiments et de câblage électrique. Si on élabore des méthodes de modélisation basées sur des considérations théoriques ou statistiques afin de gérer le risque de brouillage des installations CPL, il convient de valider leurs prévisions et portée au moyen d'expériences et de mesures dans des situations réelles. La présente section donne les résultats d'expériences sur le terrain menées au Japon.

4.1 Mesure des perturbations RF causées par un système CPL³

Un problème important pour les services de radiocommunication est le champ des perturbations, par rapport au niveau de bruit ambiant, à l'extérieur des bâtiments dans lesquels des systèmes CPL ont été installés. Dans ces expériences, le champ est mesuré au moyen d'une antenne-cadre passive située à une distance de 10 m du mur extérieur d'une habitation dans laquelle un système CPL est installé.

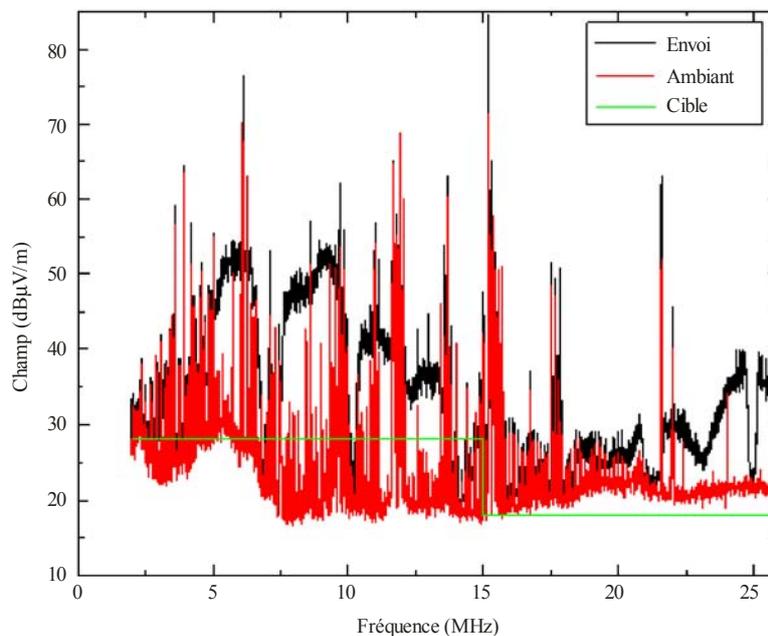
Le champ des perturbations CPL («Envoi») est mesuré lorsque le système CPL est en fonctionnement. Le champ du bruit ambiant («Ambiant») est mesuré lorsque le système CPL n'est pas en fonctionnement. Les résultats sont présentés dans la Fig. 11. Le champ des perturbations

³ Kitagawa, M. and Ohishi, M. [septembre 2008] – Measurements of the Radiated Electric Field and the Common Mode Current from the In-house Broadband Power Line Communications in Residential Environment, Proc. 8th Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2008), p. 433-438, Hamburg, Germany.

causées par le système CPL est nettement supérieur au niveau de bruit ambiant dans la majeure partie de la bande d'ondes décimétriques, et atteint 55 dB μ V/m (dans une largeur de bande de 10 kHz). Cette valeur est supérieure de plus de 30 dB au niveau de bruit ambiant. A titre de comparaison, les limites du champ fixées par les réglementations nationales applicables à l'emplacement de mesure sont de 28 dB μ V/m (au-dessous de 15 MHz) et de 18 dB μ V/m (au-dessus de 15 MHz). Les valeurs de champ mesurées sont donc supérieures aux limites fixées. De plus, au-dessous de 15 MHz, les valeurs de champ mesurées lorsque l'installation CPL est en fonctionnement sont supérieures d'environ 10 dB au niveau de bruit ambiant réel mesuré.

FIGURE 11

Perturbations RF causées par un système CPL



Report SM.2269-11

4.2 Mesure des courants RF au niveau d'une prise de courant³

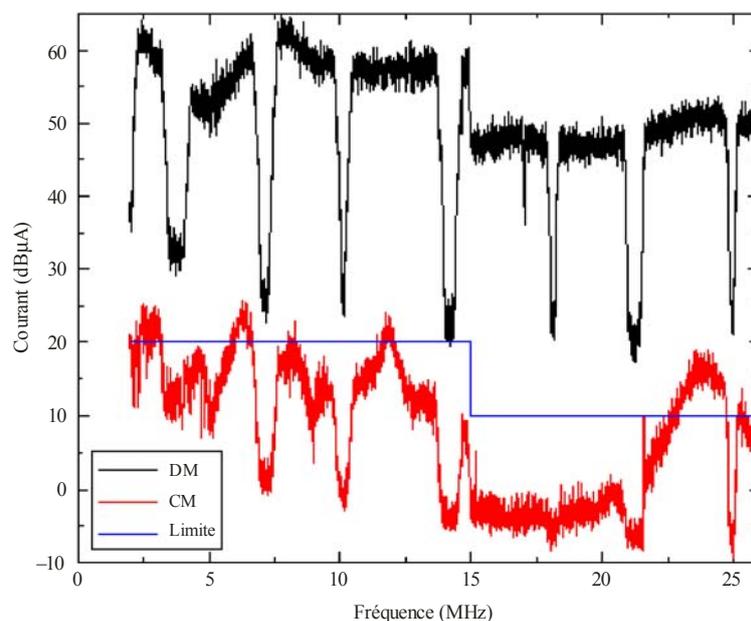
Afin de localiser l'origine des perturbations RF pour cette installation CPL, les courants RF en mode commun (CM) et en mode différentiel (DM)⁴ ont été mesurés au niveau de la prise de courant dans laquelle le signal CPL est injecté. Les résultats sont présentés dans la Fig. 12.

Dans la Fig. 12, le courant CM (diagramme du bas) respecte les niveaux autorisés (20 dB μ A au-dessous de 15 MHz et 10 dB μ A au-dessus de 15 MHz) dans la majeure partie de la bande d'ondes décimétriques. Le courant DM est de 60 dB μ A au-dessous de 15 MHz et de 50 dB μ A au-dessus de 15 MHz. Il est supérieur de 40 dB au courant CM, alors qu'il était censé n'être supérieur que de 16 dB. L'écart entre la valeur mesurée et la valeur prévue du courant DM est de 24 dB, ce qui explique pour une grande part l'écart de 27 dB entre la valeur mesurée du champ (55 dB μ V/m) et le niveau cible (28 dB μ V/m).

⁴ Voir le Chapitre 2 du Rapport UIT-R SM.2158 pour plus de précisions sur le mécanisme de production de courants RF en mode commun et en mode différentiel dans le câblage électrique.

FIGURE 12

Courants en mode différentiel et en mode commun au niveau de la prise de courant à laquelle le modem CPL est branché



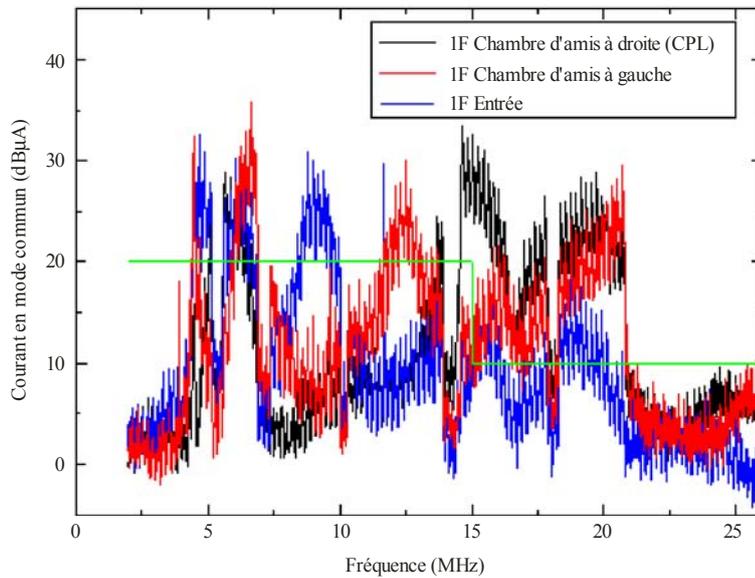
Report SM2269-12

4.3 Mesure des courants CM le long des câbles électriques³

Les courants CM le long de la ligne électrique peuvent être très différents de ceux mesurés au niveau de la prise de courant dans laquelle le signal CPL est injecté. Toutefois, il est difficile de mesurer le courant CM le long d'un câblage électrique déjà installé. En raccordant un câble électrique court (3 m) à une prise de courant non utilisée, on peut mesurer le courant CM circulant près de cette prise. Les résultats de mesure des courants CM en diverses prises sont présentés dans la Fig. 13. Le courant CM près des prises non utilisées peut être supérieur de plus de 20 dB au courant mesuré au niveau de la prise de courant dans laquelle le signal CPL est injecté et on constate qu'il dépasse de plus de 10 dB la limite fixée pour le courant CM. Le dépassement de la limite cible par les courants CM peut s'expliquer par le fait que le courant DM a un niveau nettement plus élevé que prévu.

FIGURE 13

Courants en mode commun au niveau d'une prise de courant à laquelle AUCUN modem CPL n'est branché (mesurés par la méthode du court câble d'extension)



Report SM.2269-13

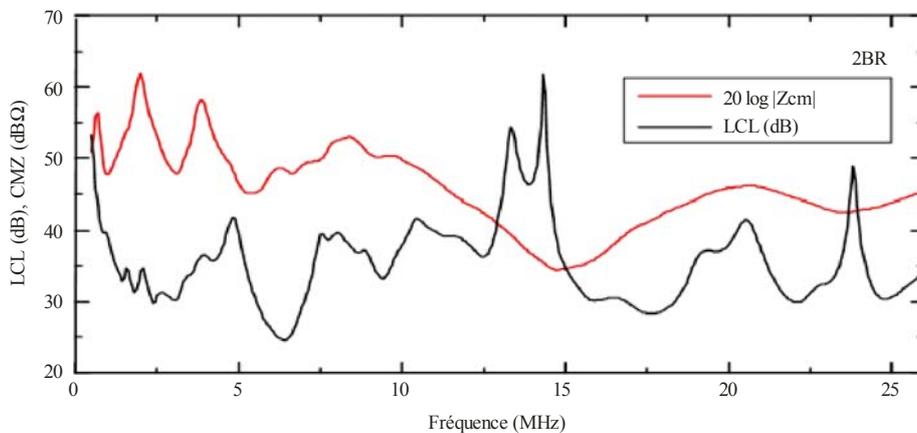
4.4 Mesure de l'affaiblissement de conversion longitudinale au niveau d'une prise

Pour fixer la limite du courant CM, on a supposé que l'affaiblissement de conversion longitudinale (LCL) était égal ou supérieur à 16 dB. Si l'affaiblissement LCL dans le réseau électrique de l'habitation est inférieur à 16 dB (autrement dit la performance est moins bonne, du fait d'une plus grande conversion du courant DM en courants CM), on peut alors s'attendre à ce que le courant CM soit supérieur à la limite prévue. Pour examiner cette possibilité, on a mesuré l'affaiblissement LCL.

Le résultat est présenté dans la Fig. 14. On observe que la valeur minimale de l'affaiblissement LCL est de 24 dB, ce qui est supérieur à 16 dB (autrement dit la performance est meilleure). On n'observe aucune corrélation négative entre l'affaiblissement LCL mesuré et le champ mesuré des perturbations CPL.

FIGURE 14

Affaiblissement LCL et impédance en mode commun mesurés au niveau d'une prise



Report SM.2269-14

4.5 Gain d'antenne équivalent d'une installation CPL en intérieur⁵

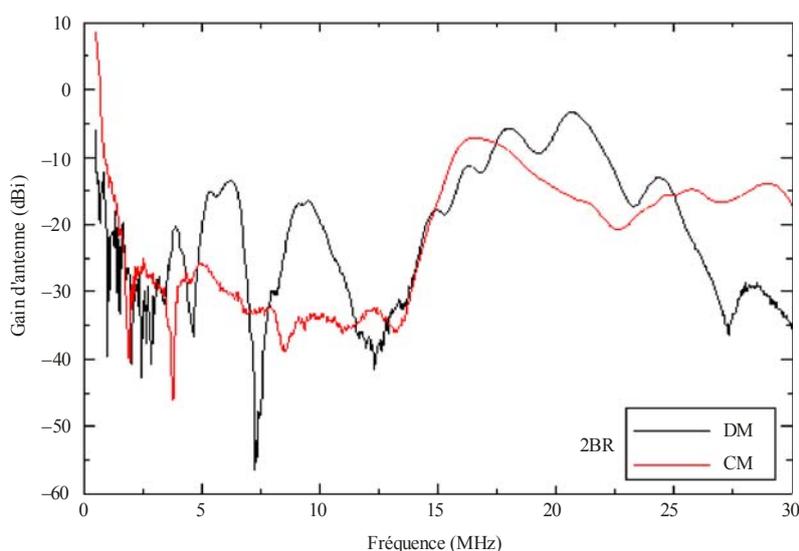
Un effet d'écran dû aux bâtiments moins important que prévu pourrait expliquer le fait que les perturbations RF mesurées sont supérieures à la limite prévue. De plus, les perturbations RF émanant de la ligne électrique dépendent aussi de la configuration géométrique du câblage, pour un même courant CM circulant le long de la ligne électrique. Il est peu probable que ces informations puissent être extraites de grandeurs telles que l'affaiblissement LCL mesuré uniquement au niveau de prises de courant.

La grandeur la plus directe et la plus fiable qui représente le facteur de conversion d'ensemble de l'intensité du signal CPL (PSD) en champ des perturbations RF est le gain d'antenne de l'ensemble de l'installation CPL, tel qu'observé à partir des courants DM de la prise électrique dans laquelle le signal DM CPL est injecté, dans l'antenne de réception à l'extérieur du bâtiment. Cette grandeur inclut à la fois l'effet d'antenne du câblage électrique et l'effet d'écran du bâtiment. Le mode DM et le mode CM au point d'injection (prise de courant) sont excités sélectivement à l'aide d'un circuit de sondage LCL; on mesure ensuite à l'aide d'un analyseur de réseau la transmittance pour le mode sélectionné de la prise dans l'antenne de référence (antenne-cadre passive) située à une distance de 10 m du mur extérieur de l'habitation.

Les résultats sont présentés dans la Fig. 15. Dans la majeure partie de la moitié inférieure de la bande d'ondes décimétriques, le gain d'antenne est plus élevé pour le mode DM que pour le mode CM. De plus, le gain d'antenne DM et le champ des perturbations présentent une forte corrélation positive. C'est ce qui explique les fortes perturbations RF à environ 6 et 9 MHz, fréquences auxquelles le gain équivalent du câblage de l'habitation est d'environ -15 dBi. Dans la moitié supérieure de la bande d'ondes décimétriques, les gains d'antenne pour les modes DM et CM sont comparables, de l'ordre de -10 à -5 dBi.

FIGURE 15

Gain d'antenne d'une installation CPL en intérieur, le signal RF étant injecté dans une prise de courant soit en mode différentiel soit en mode commun



Report SM.2269-15

⁵ Kitagawa, M. [octobre 2007] – In-situ Measurement of the Antenna Factor of in-house Power Lines, IEICE Tech. Rep., Vol. 107, EMCJ2007-54, p. 7-12 (en japonais).