

COMPILATION DE NORMES ET DOCUMENTS TRAITANT

DES RAYONNEMENTS ELECTROMAGNÉTIQUES

AUX FRÉQUENCES DU CPL LINKY

1 -	INTRODUCTION	3
2 -	DECRET n°2002-775 DU 3 MAI 2002	4
p 2/6	§ 1.1 : Grandeurs physiques	4
p 3/6 :	§ 2.1 : Restrictions de base du décret 2002 - 775.....	4
p 3/6	§ 2.2 : Niveau de référence du décret 2002 – 775.....	5
3 -	RECOMMANDATION 1999/519/CE	7
	RESTRICTIONS DE BASE ET NIVEAUX DE RÉFÉRENCE	7
p L199/64 :	Annexe 2 RESTRICTIONS DE BASE	7
p L199/66 :	Annexe 3 NIVEAUX DE RÉFÉRENCE.....	9
4 -	RAPPORT CSTB Convention de Recherche et developpement ANSES CSTB 2016 CRD 16	10
5 -	RAPPORT ANFR 2016 TECHNIQUE SUR LES COMPTEURS LINKY - Volet 1	11
p 7 :	Réglementation en matière d'exposition du public aux ondes électromagnétiques.....	11
p8 :	Niveau d'émission du protocole CPL G1	13
p8 :	Niveau d'émission du protocole CPL G3	13
6 -	ARCEP - ANNEXE 7 DE L'ARRÊTÉ DU 15 AVRIL 2010 - Mod 4.....	14
p A7-1 :	Présentation de l'annexe 7.....	14
p A7-5 :	Dispositifs de localisation, suivi et acquisition de données	14
p A7-13 :	Matériels à boucle d'induction :	15
p A7-17 :	Implants médicaux à faible puissance.....	15
7 -	JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE - 6 AOÛT 2016 Texte 27 sur 139 16	
	Section 2 - Principes de prévention.....	16
	Section 3 - Valeurs limites	16
	1° Valeurs déclenchant l'action liées aux effets biophysiques directs des champs électromagnétiques :	18
	2° Valeurs déclenchant l'action liées à certains effets indirects des champs électromagnétiques :	19
8 -	RAPPORT UIT-R SM.2158-3 de l'Union Internationale des Télécommunications.....	20
p 62 63 :	Mesures de bruit pour l'Europe	20

p 65 : Mécanismes de propagation	20
9 - RECOMMANDATION UIT-T G.9901 (04/2014)	21
p 3 : Fréquences du CPL G3 CENELEC-A	21
p 6 : Limites du signal émis	21
p 11 : Emission parasites.....	22
p 12 : ANNEXE C du UIT-T G.9901 :	23
p 13 : C.4.2 Densité spectrale parasite à l'émission.....	24
p 14 : Figure C.1 – Réseau fictif standard [EN50065-1] fig. 4 et 6	24
p 14 : C.4.3 Valeurs limites des perturbations par conduction	24
10 - SPECIFICATION DE LA COUCHE PHYSIQUE CPL G3 Document ERDF	25
p 7 : Objectif du CPL-G3	25
p 10 : Paramètres fondamentaux du système	25
p 27 : 5.13. Mappage d tonalités adaptatif et contrôle de puissance d'émission.....	26
p 28-29 : Détails de certains paramètres de la carte de répartition de tonalités.....	26
p 30 : 5.14. Passage du transformateur HTA/BT	27
p 34 : 6. Spécifications électriques du transmetteur	27
11 - LA POLLUTION ELECTROMAGNETIQUE CHRU BREST du 4 avril 2016	28
p 17 : Exposition aux ELF et limite légale du courant induit.....	28
p 20 : Conflits d'intérêt entre santé, vie privée, et intérêts financiers	29
p 22 : Rapport Copil 2013 08.....	29
12 - TRANSMISSION HAUT DEBIT SUR LES RESEAUX D'ENERGIE – Pascal PAGANI 2016 30	30
p 14 : § 1.4.1 CPL à bande étroite.....	30
p 58 : Chapitre 4 Compatibilité électromagnétique des systèmes CPL.....	32
p 63 : Ajustement adaptatif de la puissance CPL émise.....	33
p 67 : Techniques de mitigation des émissions par retournement temporel.....	33
p 78 : Chapitre 6 Communications CPL et efficacité énergétique	33
p 93 : Technologies de communication pour le Smart Grid : CPL et radio	34
p 94 : CEM cognitive et communication coopérative pour les réseaux CPL	35
13 - UNITES DU CHAMP MAGNETIQUE - CONVERSIONS Tesla, Gauss, Ampère/mètre, dBm36	36
Wikipedia : Unités du champ magnétique	36
Valeurs du champ Magnétique B	36
Convertir des dBμA/m en nT	36
Le dBm	37
Champ magnétique et distance de l'émetteur	37
13.1 - Conversion des V/m et nanoteslas.....	37

1 - INTRODUCTION

Ce document réalisé par le Laboratoire de Recherches de **Robin des Toits MidiPy** réunit les extraits d'un certain nombre de thèses, mémoires, normes, décrets, arrêtés, recommandations européens qui traitent de valeurs physiques à respecter dans le domaine des radiofréquences du système CPL Linky G1 et G3, à savoir entre **35,9 kHz** et **90,6 kHz**.

Pour ces fréquences, les extraits peuvent définir des champs électriques, magnétiques, des perturbations par conduction, par rayonnement, ou susceptibilité électromagnétique pour les systèmes radiocommunication qui garantissent le respect de la **santé du public** par les communications CPL Linky.

Ils donnent aussi des informations techniques ou issues d'études théoriques permettant de mieux cerner les différents éléments qui peuvent être impactés par les transmissions du CPL aux fréquences du Linky.

Plusieurs textes légiférant les fréquences du CPL Linky montrent que son rayonnement parasite peut attenter à la santé du grand public, comme par exemple les valeurs recommandées par l'[annexe 7 de l'arrêté ARCEP du 10 avril 2010](#) découlant de la Décision 2008/432/CE sur le champ maximal parasite qui devrait être respecté en présence de matériel médical qui sont faibles et pourraient être dépassées par le rayonnement du CPL Linky parcourant les câbles du réseau 230V. Où bien encore l'incohérence entre restrictions de base et valeurs de références dans le [décret 2002-775](#).

Chaque extrait est précédé de sa page dans le document pour le retrouver facilement. Cette compilation est évolutive. Nous remercions par avance toute personne qui ferait part à Robin des Toits MidiPy d'éléments importants non encore mentionnés et susceptibles de compléter ce tour d'horizon.

2 - DECRET n°2002-775 DU 3 MAI 2002

"Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques."

NOR: INDI0220135D Version consolidée au 28 juin 2018
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000226401>

ndlr : Le décret 2002-775 du 3 mai 2002 remplace, en reprenant pratiquement tous ses termes, la recommandation européenne 1999/519/CE/12/07/99 pour la définition du champ maximal admissible entre 1 Hz et 300 GHz de façon à respecter le courant induit dans le corps humain.

Valeur de référence et restriction de base du champ magnétique limite :

Le décret 2002-775 du 3 mai 2002 définit principalement pour toutes les fréquences entre 1 Hz et 300 GHz, une valeur de référence pour le champ magnétique auquel peut être soumis un être humain, avec une restriction de base, prioritaire sur cette valeur de référence pour s'assurer que le courant induit dans le corps par un champ magnétique reste dans le gabarit de sécurité en mA/m² défini par la recommandation.

La restriction de base prévaut sur la valeur de référence du champ magnétique.

p 2/6 § 1.1 : Grandeurs physiques

L'induction magnétique (densité de flux magnétique) est une grandeur vectorielle (B) définie en termes de force exercée sur des charges circulantes, et elle est exprimée en teslas (T). En espace libre et dans les matières biologiques, l'induction magnétique et l'intensité de champ magnétique peuvent être utilisées indifféremment selon l'équivalence $1 \text{ A.m-1} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$.

p 3/6 : § 2.1 : Restrictions de base du décret 2002 - 775

Les restrictions concernant l'exposition à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variables dans le temps, qui sont fondées directement sur des effets avérés sur la santé et des considérations biologiques, sont qualifiées de "restrictions de base". En fonction de la fréquence du champ, les grandeurs physiques utilisées pour spécifier ces restrictions sont l'induction magnétique (B), la densité de courant (J), le débit d'absorption spécifique de l'énergie (DAS) et la densité de puissance (S).

Valeurs limites d'exposition du public

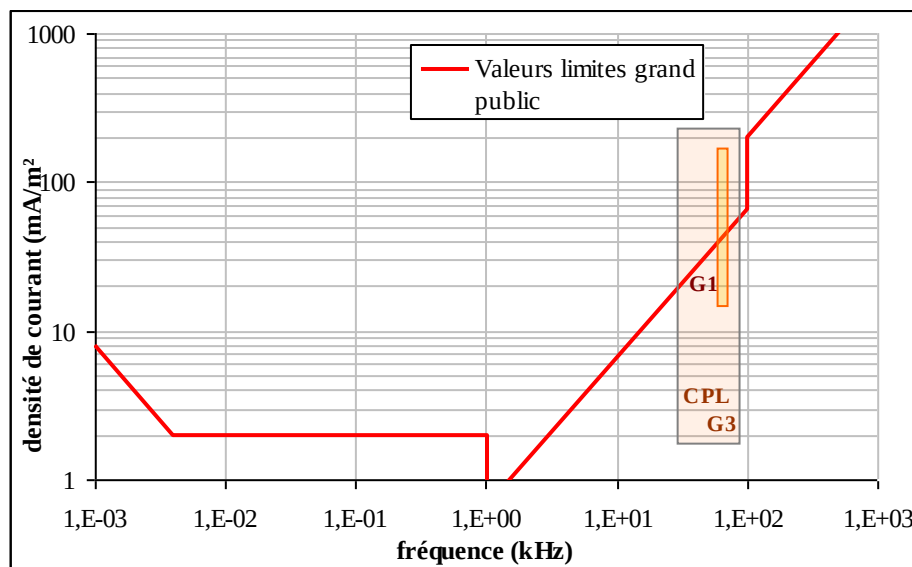
GAMME DES FRÉQUENCES	INDUCTION magnétique (mT)	DENSITÉ de courant S (mA/m ²) (valeur efficace)	MOYENNE DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	DENSITÉ de puissance S (W/m ²)
0 Hz	40	-	-	-	-	-
> 0-1 Hz	-	8	-	-	-	-
1-4 Hz	-	8/f	-	-	-	-
4-1 000 Hz	-	2	-	-	-	-
1 000 Hz-100 kHz	-	f/1500	-	-	-	-
100 kHz-10 MHz	-	f/500	0,08	2	4	-
10 MHz-10 GHz	-	-	0,08	2	4	-
10-300 GHz	-	-	-	-	-	10

Restrictions de base du décret 2002 - 775

Notes. - 1. f est la fréquence en Hz.

2. En raison de l'hétérogénéité électrique du corps, la valeur moyenne des densités de courants devrait être évaluée sur une section de 1 cm^2 perpendiculaire à la direction du courant.

3. Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de crête de densité du courant peuvent être obtenues en multipliant la valeur efficace par 2 (1,414).



Restrictions de base sur le courant induit dans le corps humain décret 2002-775

ndlr : Le décret 2002- 775 est 3 fois plus protecteur que la recommandation 1999/519/CE entre 1 et 100 kHz, là où sont repérées les zones des fréquences CPL G1 et G3.

La restriction de base définit sur l'ensemble des fréquences le courant induit maximal qui ne doit jamais être dépassé dans le corps humain s'il est soumis à un champ magnétique alternatif, ceci quelque soit l'organe exposé.

à 30 kHz : 20 mA/m² à 70 kHz : 46 mA/m² à 90 kHz : 60 mA/m²

p 3/6 § 2.2 : Niveau de référence du décret 2002 – 775

Niveaux de référence. Ces niveaux sont fournis aux fins de l'évaluation de l'exposition dans la pratique pour déterminer si les restrictions de base risquent d'être dépassées. Certains niveaux de référence sont dérivés des restrictions de base concernées au moyen de mesures et/ou de techniques de calcul, et certains autres ont trait à la perception et à des effets nocifs indirects de l'exposition aux champs électromagnétiques. Les grandeurs dérivées sont l'intensité de champ électrique (E), l'intensité de champ magnétique (H), l'induction magnétique (B), la densité de puissance (S), et les courants induits dans les extrémités (IL). Les grandeurs qui concernent la perception et d'autres effets indirects sont les courants (de contact IC) et, pour les champs pulsés, l'absorption spécifique (AS). Dans une situation d'exposition particulière, des valeurs mesurées ou calculées de ces grandeurs peuvent être comparées avec le niveau de référence approprié. Le respect du niveau de référence garantira le respect de la restriction de base correspondante. Si la valeur mesurée est supérieure au niveau de référence, il n'en découle pas nécessairement un dépassement de la restriction de base.

ndlr : La phrase "**Le respect du niveau de référence garantira le respect de la restriction de base correspondante**" est **faux** puisque le courant induit dans un organe exposé à un champ magnétique n'est pas constant et dépend directement de sa conductivité, sa géométrie, et son voisinage direct.

De plus, entre décret 2002-775 et recommandation 1999/519/CE, la restriction de base est réduite d'un facteur trois alors que la valeur de référence ne change pas.

Lire l'étude "*Effets d un champ magnetique sur un organe.pdf*" sur le site de [Robin des Toits Midi Pyrénées](#) - en direct du Labo

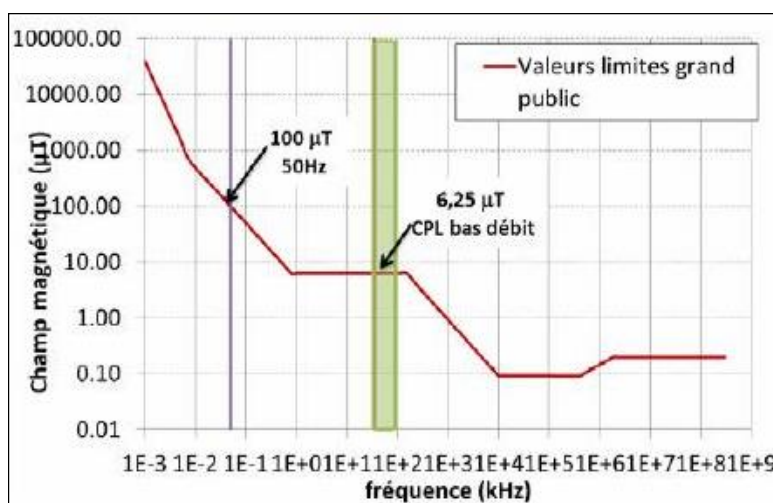
A. - Niveaux des champs

GAMME de fréquences	E(V/m)	H(A/m)	B(μT)	DENSITÉ de puissance équivalente en onde plane Seq (W/m²)
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	-
1-8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	-
8-25 Hz	10 000	$4\,000/f$	$5\,000/f$	-
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	-
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	-
3-150 kHz	87	5	6,25	-
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	-
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	-
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,003\,7 f^{1/2}$	$0,004\,6 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Notes. - 1. f est la fréquence en Hz.

2. En raison de l'hétérogénéité électrique du corps, la valeur moyenne des densités de courants devrait être évaluée sur une section de 1 cm² perpendiculaire à la direction du courant.

3. Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de crête de densité du courant peuvent être obtenues en multipliant la valeur efficace par 2 (1,414).



Niveaux de référence sur le champ magnétique reçu par le public décret 2002-775

ndlr : valeurs du décret 2002-775 : CPL entre 30 kHz et 90 kHz : 6,25 μT et 87 V/m

3 - RECOMMANDATION 1999/519/CE

"relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques (0 Hz à 300 GHz)"

ndlr : Cette recommandation parue en 1999 a été depuis remplacée par le décret 2002-775 en 2002.

"Journal officiel des Communautés européennes "

p L199/62 : Annexe 1

- la densité de courant (J) est définie comme le courant traversant une unité de surface perpendiculaire au flux de courant dans un volume conducteur tel que le corps humain ou une partie du corps, exprimée en ampères par m² (A/m²),

- l'intensité de champ électrique est une grandeur vectorielle (E) qui correspond à la force exercée sur une particule chargée indépendamment de son déplacement dans l'espace. Elle est exprimée en volts par mètre (V/m),

- l'intensité de champ magnétique est une grandeur vectorielle (H) qui, avec l'induction magnétique, définit un champ magnétique en tout point de l'espace. Elle est exprimée en ampères par mètre (A/m),

- l'induction magnétique (densité de flux magnétique) est une grandeur vectorielle (B) définie en terme de force exercée sur des charges circulantes, et elle est exprimée en teslas (T). En espace libre et dans les matières biologiques, l'induction magnétique et l'intensité de champ magnétique peuvent être utilisées indifféremment selon l'équivalence $1 \text{ Am}^{-1} = 4.\pi.10^{-7} \text{ T}$

RESTRICTIONS DE BASE ET NIVEAUX DE RÉFÉRENCE

Pour l'application de restrictions fondées sur l'évaluation d'effets éventuels des champs électromagnétiques sur la santé, il conviendrait de faire une distinction entre restrictions de base et niveaux de référence.

Note: Ces restrictions de base et niveaux de référence en vue de limiter l'exposition ont été mis au point après avoir passé soigneusement en revue toute la documentation scientifique publiée. L'induction du cancer en tant que risque d'une exposition à long terme n'a pas été considérée comme établie. Toutefois, étant donné qu'il y a un coefficient de sécurité d'environ 50 entre les valeurs seuils pour l'apparition d'effets aigus et les valeurs des restrictions de base, la présente recommandation couvre implicitement les effets éventuels à long terme dans la totalité de la gamme de fréquences.

Les restrictions concernant l'exposition à des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques variables dans le temps qui sont fondées directement sur des effets avérés sur la santé et des considérations biologiques sont qualifiées de «restrictions de base».

p L199/64 : Annexe 2 RESTRICTIONS DE BASE

— entre 0 et 1 Hz, des restrictions de base sont prévues pour l'induction magnétique concernant les champs magnétiques statiques (0 Hz) et la densité de courants pour les champs variables dans le temps jusqu'à 1 Hz, afin de prévenir des effets sur le système cardiovasculaire et le système nerveux central;

— entre 1 Hz et 10 MHz, des restrictions de base sont prévues pour la densité de courant afin de prévenir des effets sur les fonctions du système nerveux;

— entre 100 kHz et 10 GHz, des restrictions de base concernant le DAS sont prévues pour prévenir un stress thermique généralisé du corps et un échauffement localisé excessif des tissus. Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kHz et 10 MHz, des restrictions sont prévues concernant à la fois la densité de courants et le DAS;

— entre 10 GHz et 300 GHz, des restrictions de base concernant la densité de puissance sont prévues pour prévenir un échauffement des tissus à la surface du corps ou à proximité de cette surface.

Les restrictions de base, figurant au tableau 1, sont fixées de manière à tenir compte d'incertitudes liées à la sensibilité personnelle, aux conditions environnementales, et de la diversité de l'âge et de l'état de santé du public.

**Restrictions de base pour les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques
(0 Hz-300 GHz)**

Gamme des fréquences	Induction magnétique (mT)	Densité de courant S (mA/m ²) (valeur efficace)	Moyenne DAS pour l'ensemble du corps (W/kg)	DAS localisé (tête et tronc) (W/kg)	DAS localisé (membres) (W/kg)	Densité de puissance S (W/m ²)
0 Hz	40	—	—	—	—	—
>0-1 Hz	—	8	—	—	—	—
1-4 Hz	—	8/f	—	—	—	—
4-1 000 Hz	—	2	—	—	—	—
1 000 Hz-100 kHz	—	f/500	—	—	—	—
100 kHz-10 MHz	—	f/500	0,08	2	4	—
10 MHz-10 GHz	—	—	0,08	2	4	—
10-300 GHz	—	—	—	—	—	10

1. f est la fréquence en Hz.

2. La restriction de base sur la densité du courant doit protéger contre les effets aigus de l'exposition sur les tissus du système nerveux central au niveau de la tête et du tronc et inclut un coefficient de sécurité. Les restrictions de base pour les champs de fréquences extrêmement basses (EBF) sont basées sur les effets nocifs avérés sur le système nerveux central. Ce type d'effets aigus est essentiellement instantané, et d'un point de vue scientifique, il n'y a aucune raison de modifier les restrictions de base pour les expositions de courte durée. Toutefois, puisque la restriction de base est fondée sur les effets nocifs sur le système nerveux central, elle peut permettre des densités de courant plus élevées dans les tissus corporels autres que le système nerveux central dans les mêmes conditions d'exposition.

3. En raison de l'hétérogénéité électrique du corps, la valeur moyenne des densités de courants devrait être évaluée sur une section de **1 cm²** perpendiculaire à la direction du courant.

4. Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de crête de densité du courant peuvent être obtenues en multipliant la valeur efficace par $\sqrt{2}$ (=1,414). Pour des impulsions de durée **tp** la fréquence équivalente à appliquer dans les restrictions de base devrait être calculée selon la formule **$f = 1/(2tp)$** .

5. Pour des fréquences jusqu'à 100 kHz et pour des champs magnétiques pulsés, la densité maximale de courant associée aux impulsions peut être calculée à partir des temps de montée/descente et de la vitesse maximale de fluctuation de l'induction magnétique. La densité de courants induits peut alors être comparée avec la restriction de base appropriée.

ndlr : Le décret 2002-775 est 3 fois plus protecteur pour le grand public que la recommandation 1999/519/CE entre 1 et 100 kHz.

La recommandation 1999/519/CE donnait à 30 kHz : 60 mA/m² à 70 kHz : 130 mA/m² à 90 kHz : 180 mA/m²

Des niveaux d'exposition de référence sont prévus afin de permettre la comparaison avec les valeurs mesurées. **Le respect de tous les niveaux de référence recommandés garantira le respect des restrictions de base.**

Si les valeurs mesurées sont supérieures aux niveaux de référence, il n'en découle pas nécessairement un dépassement des restrictions de base. Dans ce cas, il conviendrait d'évaluer si les niveaux d'exposition sont inférieurs aux restrictions de base.

Les niveaux de référence pour la limitation de l'exposition sont obtenus sur la base des restrictions de base pour le couplage maximal du champ avec l'individu exposé, ce qui fournit ainsi la protection maximale. Une récapitulation des niveaux de référence est présentée dans les tableaux 2 et 3. Les niveaux de référence sont généralement destinés à constituer des valeurs moyennes dans l'espace par rapport à la dimension du corps de l'individu exposé, mais avec cette condition importante qu'il n'y ait pas de dépassement des restrictions de base localisées concernant l'exposition. Dans certaines situations où l'exposition est fortement localisée, comme c'est le cas avec des téléphones portables, par rapport à la tête, l'utilisation des niveaux de référence n'est pas appropriée.

ndlr : Les phrases soulignées **en rouge** sont inexactes pour le Laboratoire de Recherche de Robin des Toits puisque le courant induit dans un organe exposé à un champ magnétique n'est pas constant et dépend directement de sa conductivité, sa géométrie, et son voisinage direct.
Lire l'étude "[Effets d un champ magnetique sur un organe.pdf](#)" sur le site de [Robin des Toits Midi Pyrénées](#) - en direct du Labo

Tableau 2

Niveaux de référence pour les champs électriques, magnétiques et électromagnétiques
[à 0 Hz-300 GHz, valeurs efficaces (rms — root mean square/valeur quadratique moyenne) en champ non perturbé]

Gamme de fréquences	E (V/m)	H (A/m)	B (μT)	Densité de puissance équivalente en onde plane S_{eq} (W/m ²)
0-1 Hz	—	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	—
1-8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	—
8-25 Hz	10 000	$4\,000/f$	$5\,000/f$	—
0,025-0,8 kHz	$250/f$	$4/f$	$5/f$	—
0,8-3 kHz	$250/f$	5	6,25	—
3-150 kHz	87	5	6,25	—
0,15-1 MHz	87	$0,73/f$	$0,92/f$	—
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	—
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2 000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$0,0046 f^{1/2}$	$f/200$
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

Pour les valeurs de crête, les niveaux de référence suivants s'appliquent pour le champ électrique E (V/m), et pour le champ magnétique H (A/m) et B (μT) :

— pour des fréquences jusqu'à 100 kHz, les valeurs de référence de crête sont obtenues en multipliant les valeurs efficaces (rms) correspondantes par $\sqrt{2}$ ($\approx 1,414$). Pour des impulsions de durée t_p , la fréquence équivalente à appliquer devrait être calculée selon la formule $f = 1/(2t_p)$

— pour des fréquences comprises entre 100 kHz et 10 MHz, les valeurs de référence de crête sont obtenues en multipliant les valeurs efficaces (rms) correspondantes par : 10α ,
où $\alpha = [0,665 \log(f/105) + 0,176]$, f étant exprimée en Hz.

ndlr : Recommandation 1999/519/CE ident. au décret 2002-775 ! CPL de 30 kHz à 90 kHz : 6,25μT et 87V/m

p 7 :

1.3 - Technologies CPL

La bande de fréquences utilisée par les communications CPL des compteurs Linky est la bande CENELEC A, comprise entre 3 kHz et 95 kHz, dont les spécifications techniques sont données dans la norme harmonisée NF EN 5065-1².

Il existe deux technologies distinctes de communications CPL Linky, et donc de compteurs Linky :

- Compteurs de type G1, déployés jusqu'à fin 2016, qui utilisent deux fréquences en modulation S-FSK (*Spread Frequency Shift Keying*) : 63,3 kHz et 74 kHz.
- Compteurs de type G3, déployés à partir de 2017, qui utilisent la bande de fréquences comprise entre 35,9 kHz et 90,6 kHz avec une modulation de type OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) sur 36 porteuses.

² NF EN 50065-1 (juillet 2012) : Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz - Partie 1 : règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques. Il s'agit d'une norme harmonisée.

N/Réf. DSC/ECE/2017-011/FG/BG

p 9 :

➔ Mesures de champ magnétique

Le niveau de champ magnétique est mesuré dans la bande de fréquences CPL Linky. Dans ce rapport, les niveaux de champ magnétique sont exprimés en μT ($1 \mu\text{T} \sim 1.254 \text{ A/m}$). La

³ ANFR. 2016b : « Ces mesures confirment que la transmission CPL, que ce soit lors des requêtes élémentaires de la surveillance du réseau ou lors de la collecte des données, ne conduit pas à une augmentation significative du niveau d'exposition en champ électrique. ».

N/Réf. DSC/ECE/2017-011/FG/BG

Titre : Rapport Technique sur les niveaux de champ électromagnétiques créés par les compteurs linky
VOLET 1 : mesures en laboratoire Mai 2016

p 5 :

La technologie CPL utilise le réseau électrique pour transmettre des informations. Elle consiste à coupler un signal haute fréquence (HF) au signal 50 Hz du réseau électrique (cf. Figure 2). Le signal HF peut ainsi se propager sur l'installation électrique et être reçu par tout récepteur CPL connecté à ce même réseau. Le signal utile n'est pas diffusé par rayonnement mais par conduction, via le réseau électrique. Les installations CPL ne sont donc pas des réseaux radioélectriques. Toutefois, la modulation du courant dans les câbles électriques produit des ondes rayonnées. Ces rayonnements non intentionnels sont réglementés de façon à ne pas perturber outre mesure leur environnement électromagnétique : ces compteurs sont donc conçus pour respecter les normes de compatibilité électromagnétique. Ils doivent également respecter les valeurs-limites d'exposition du public aux ondes électromagnétiques.

p 6 :

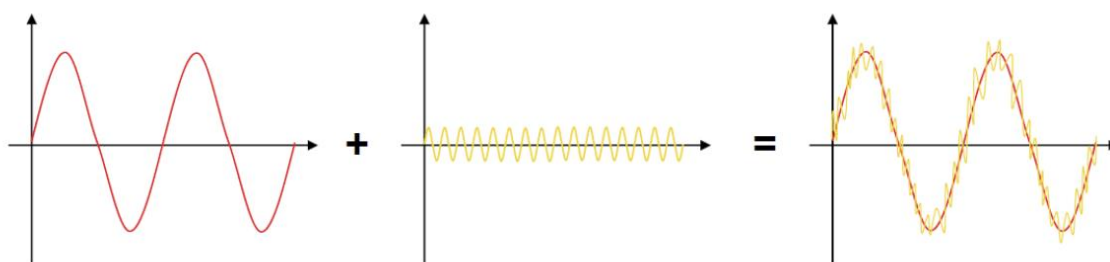


Figure 2 : illustration du principe général du CPL c'est-à-dire la superposition d'un signal 50 Hz à un signal plus haute fréquence

p 7 : Réglementation en matière d'exposition du public aux ondes électromagnétiques

2. Réglementation en matière d'exposition du public aux ondes électromagnétique

En France, le décret n° 2002-775¹ du 3 mai 2002 fixe les valeurs-limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. Ces limites ont été proposées, au niveau international, par le comité de protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP), association officiellement reconnue par l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS), dans son guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques en 1998. L'Union Européenne a repris ces limites dans sa recommandation 1999/519/CE.

Les valeurs-limites dépendent des fréquences (cf. Figure 3). Pour la bande de fréquence CPL bas débit utilisée par les compteurs Linky (35,9 - 90,6 kHz), elles valent 6,25 μ T pour le champ magnétique et 87 V/m pour le champ électrique.

p 7 :

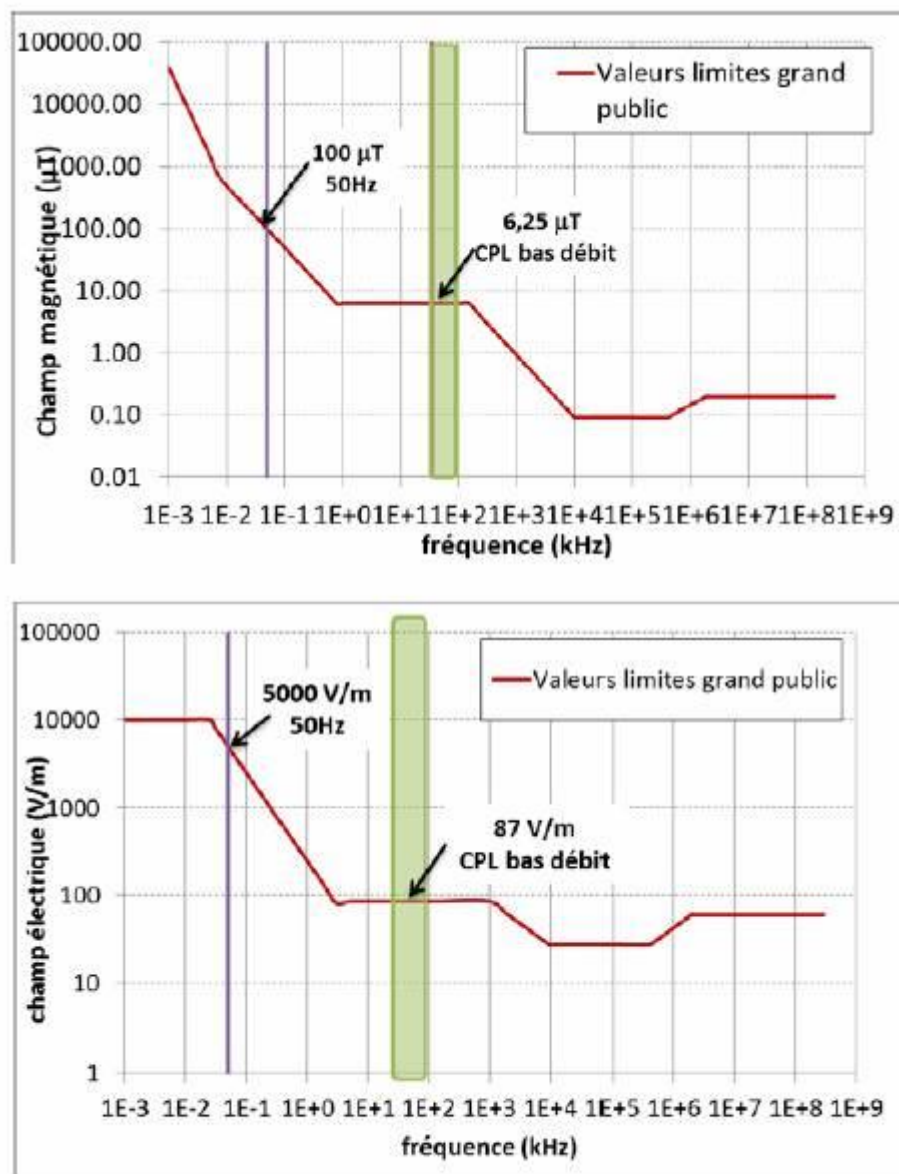


Figure 3 : valeurs-limites fixées par le décret du 3 mai 2002 en champ magnétique exprimé en μT et en champ électrique exprimé en V/m

¹ <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000226401>

p 1 :

Quelle est la réglementation en matière d'exposition du public aux ondes électromagnétiques ?

En France, le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 fixe les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques. Pour la bande de fréquence mise en œuvre par le CPL bas débit utilisés par les compteurs Linky (35,9-90,6 kHz), ces valeurs limites sont respectivement de 6,25 μT pour le champ magnétique et de 87 V/m pour le champ électrique.

p8 : Niveau d'émission du protocole CPL **G1**

L'information est transmise en CPL suivant une modulation par déplacement de fréquence ou S-FSK pour « *spread frequency shift-keying* ». Le signal est modulé suivant deux fréquences prédéterminées, 63,3 kHz et 74 kHz dans le cas du signal Linky G1. Une porteuse est ainsi utilisée pour coder le bit « 0 » et l'autre pour coder le bit « 1 ». L'écart de 10 kHz entre les deux porteuses permet de s'affranchir de la qualité de leur transmission respective. Chaque sous-porteuse présente une largeur de bande de 5 kHz. Les émissions ne sont pas simultanées dans les deux bandes de fréquences.

Le niveau d'émission « conduit » est réglementé par la norme NF EN 50065-1 pour la tension de sortie de l'émetteur. Pour des signaux bande étroite (c'est-à-dire dont la largeur de bande est inférieure à 5 kHz), le niveau de tension en sortie décroît linéairement de 134 dB μ V (5 V) à 9 kHz à 120 dB μ V (1 V) à 95 kHz.

p8 : Niveau d'émission du protocole CPL **G3**

Le compteur G3 correspond au compteur Linky de deuxième génération. Il utilise un protocole de communication plus évolué, fondé sur un multiplexage par répartition orthogonale de fréquences ou OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*). L'OFDM consiste à répartir le signal à transmettre sur un plus grand nombre de sous-porteuses. Dans le cas du protocole Linky G3, ce sont 36 sous-porteuses comprises entre 35,9 et 90,6 kHz qui sont utilisées, par blocs de 6.

Le niveau d'émission « conduit » est réglementé par la norme NF EN 50065-1 pour la tension de sortie de l'émetteur. Pour les signaux large bande, le niveau de tension en sortie doit être inférieur à 134 dB μ V.

6 - ARCEP - ANNEXE 7 DE L'ARRÊTÉ DU 15 AVRIL 2010 - Mod 4

Décision 2008/432/CE Décision ARCEP 2007-1065 et 1066

ARCEP : Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes

ANNEXE 7

FRÉQUENCES UTILISABLES POUR CERTAINS MATERIELS DE FAIBLE PUISSANCE ET DE FAIBLE PORTEE

Edition 2008[©] Mod 4

A7-1

15 avril 2010

p A7-1 : Présentation de l'annexe 7

La présente annexe indique les bandes de fréquences disponibles en France pour les appareils de faible puissance et de faible portée (AFP) et les conditions techniques de partage avec les services de radiocommunications dans ces bandes.

Les conditions d'utilisation de ces bandes de fréquences par les AFP sont précisées :

- en Régions 1 et 2, par des décisions de l'ARCEP en application des articles L. 33-3 et L. 36-6 du code des postes et des communications électroniques et homologuées par le ministre chargé des communications électroniques ; en l'absence de telles décisions, ces bandes de fréquences ne sont pas autorisées pour cet usage ;

La présente annexe tient compte des décisions de la Commission européenne adoptées en application de la décision 676/2002/CE (décision spectre radioélectrique), de la recommandation ERC/REC 70-03 du Comité des communications électroniques (ECC) sur les appareils à faible portée et des décisions ECC associées. Lorsque ces décisions ou recommandations européennes sont référencées dans l'annexe, elles ne le sont qu'à titre indicatif.

Aucune garantie de protection n'est accordée à ces dispositifs radioélectriques. De plus, ces appareils ne doivent en aucun cas causer des brouillages aux installations autorisées par les affectataires de la bande concernée au titre du Tableau national de répartition des bandes de fréquences.

On peut consulter la base de données fréquences sur son site de l'ARCEP - Fréquences de l'Autorité de régulation des communications électroniques et des postes internet à l'adresse www.arcep.fr

p A7-5 : Dispositifs de localisation, suivi et acquisition de données

II. Localisation, suivi et acquisition de données

Bande de fréquences ou fréquence centrale du canal	Puissance rayonnée / champ max.	Paramètres additionnels	Références / observations
457 kHz	7 dBμA/m à 10m	Porteuse sans modulation	Décisions ART 03-405 et 03-406 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 2) DéTECTEURS de victimes d'avalanches
169,4 à 169,475 MHz	500 mW p.a.r.	Canalisation : 12,5 kHz	Décision ARCEP 2007-689 Décision 2005/928/CE Systèmes de relevé de compteurs et dispositifs de localisation et de poursuite

p A7-13 : Matériels à boucle d'induction :

IX. Matériels à boucle d'induction

Bande de fréquences	Champ max.	Paramètres additionnels	Références / observations
9 à 59,750 kHz	72 dBµA/m à 10 m = 5 nT	-	Décision 2008/432/CE Décision ARCEP 2007-1065
59,750 à 60,250 kHz	42 dBµA/m à 10 m = 0,16 nT	-	
60,250 à 70 kHz	69 dBµA/m à 10 m = 3,54 nT	-	
70 à 119 kHz	42 dBµA/m à 10 m = 0,16 nT	-	
119 à 135 kHz	66 dBµA/m à 10 m = 2,5 nT	-	
135 à 148,5 kHz	42 dBµA/m à 10 m = 0,16 nT	-	Décision 2008/432/CE Décision ARCEP 2007-1065
148,5 à 5 000 kHz	-15 dBµA/m à 10 m -5 dBµA/m à 10 m pour les canaux de largeur de bande supérieure à 10 kHz avec une densité maximale du champ magnétique de -15 dBµA/m/10 kHz à 10 m	= 0,0002 nT -	
400 à 600 kHz	-8 dBµA/m à 10 m -5 dBµA/m à 10 m pour les canaux de largeur de bande supérieure à 10 kHz avec une densité maximale du champ magnétique de -8 dBµA/m/10 kHz à 10 m	= 0,0005 nT -	

ndlr : Nous avons rajouté dessus la conversion des dBµA/m en nanoteslas - voir § [Convertir des dBµA/m en nT](#)

p A7-17 : Implants médicaux à faible puissance

XII. Implants médicaux à faible puissance

Dans le cas d'implants médicaux qui peuvent engager la sécurité de la vie humaine, rappelant que les appareils de faible portée (AFP) opèrent sans garantie de protection, les industriels et les utilisateurs devraient faire particulièrement attention au brouillage qui pourrait être causé par d'autres systèmes radioélectriques fonctionnant dans les mêmes bandes ou dans des bandes adjacentes.

Bande de fréquences	Puissance rayonnée / champ max.	Paramètres additionnels	Références / observations
9 à 315 kHz	30 dBµA/m à 10 m	= 0,04 nT -	Décision 2008/432/CE Décision ARCEP 2007-1066
315 à 600 kHz	- 5 dBµA/m à 10 m	= 0,0007 nT -	Décision ARCEP 2007-1066 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 12)
12,5 à 20 MHz	- 7 dBµA/m à 10 m	= 0,00056 nT -	Décision ARCEP 2007-1066 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 12)
30 à 37,5 MHz	1 mW p.a.r.	-	Décision ARCEP 2007-1066 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 12)
401 à 402 MHz	25 µW p.a.r.	Canalisation : 25 à 100 kHz par multiple de 25 kHz	Décision ARCEP 2007-1066 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 12)
402 à 405 MHz	25 µW p.a.r.	Canalisation : 25 à 300 kHz par multiple de 25 kHz. Des largeurs de bande supérieures à 300 kHz peuvent être utilisées sous certaines conditions	Décision 2009/381/CE Décision ARCEP 2007-1066
405 à 406 MHz	25 µW p.a.r.	Canalisation : 25 à 100 kHz par multiple de 25 kHz	Décision ARCEP 2007-1066 Recommandation ERC/REC/70-03 (annexe 12)

ndlr :

- Nous avons rajouté dessus la conversion des dBµA/m en nanoteslas - voir § [Convertir des dBµA/m en nT](#)

- Les valeurs de ce tableau recommandées pour ne pas perturber les appareils médicaux, professionnels ou portatifs (pacemakers, ...) sont très faibles. Le courant CPL Linky parcourant les fils électriques du réseau 230 V peut facilement induire à ces fréquences des champs magnétiques supérieurs à ces valeurs.

Voir à ce propos les rapports du Laboratoire de recherches d Robin des Toits Midi Pyrénées :

[Mesure Rayonnement magnetique CPL Linky en habitat.pdf](#)

[Champ Magnetique CPL toulouse et DataLog Balma 2018 03 31.pdf](#)

Section 2 - Principes de prévention

Art. R. 4453-2. – La réduction des risques liés à l'exposition aux champs électromagnétiques se fonde sur les principes généraux de prévention mentionnés à l'article L. 4121-2.

Section 3 - Valeurs limites

Art. R. 4453-3. – L'exposition d'un travailleur à des champs électromagnétiques ne dépasse pas les valeurs limites d'exposition suivantes :

FREQUENCES (f) (1)	VALEURS LIMITES D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE						
	Effets biophysiques directs		« Effets sensoriels »		« Effets sur la santé »		
			Exposition localisée de la tête	Exposition localisée des membres	Exposition ensemble du corps	Exposition localisée de la tête et du tronc	Exposition localisée des membres
0 Hz ≤ f < 1 Hz (2)	Effets non thermiques	.	2 T	8 T	8 T	-	-
1 Hz ≤ f < 10 Hz (3)			0,7/f V.m ⁻¹	-	1,1 V.m ⁻¹	-	-
10 Hz ≤ f < 25 Hz (3)			0,07 V.m ⁻¹	-		-	-
25 Hz ≤ f ≤ 400 Hz (3)			0,0028 f V.m ⁻¹	-		-	-
400 Hz < f < 3 kHz (3)			-	-		-	-
3 kHz ≤ f < 100 kHz (3)			-	-	3,8x10 ⁻⁴ f V.m ⁻¹	-	-
100 kHz ≤ f < 10 MHz (3) (4) (5)	Effets thermiques	.	-	-	3,8x10 ⁻⁴ f V.m ⁻¹ (non thermique) 0,4 W.kg ⁻¹ (thermique)	10 W.kg ⁻¹	20 W.kg ⁻¹
10 MHz ≤ f < 0,3 GHz (4)			-	-	0,4 W.kg ⁻¹		
0,3 GHz ≤ f < 6 GHz (4) (6)			10 mJ.kg ⁻¹	-			
6 GHz ≤ f ≤ 300 GHz (7)					-	-	50 W.m ⁻²
(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz)							
(2) Dans la gamme de fréquences comprises entre 0 et 1 hertz, les valeurs limites d'exposition sont des valeurs d'induction magnétique externe exprimées en tesla							
(3) Dans la gamme de fréquences comprises entre 1 hertz et 10 mégahertz, les valeurs limites d'exposition sont des valeurs crête spatiale du champ électrique interne exprimées en volt par mètre							
(4) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 6 gigahertz, les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sur la santé représentent l'énergie moyenne sur l'ensemble ou une partie du corps (tête, tronc, membres) exprimée en termes de débit d'absorption spécifique en watt par kilogramme							
(5) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 10 mégahertz, les effets thermiques et non thermiques agissant concomitamment, les valeurs limites d'exposition pour les deux types d'effets doivent être considérées							
(6) Dans la gamme de fréquences comprises entre 0,3 et 6 gigahertz, la valeur limite d'exposition relative aux effets sensoriels représente l'énergie absorbée par unité de masse de tissus biologiques exprimée en termes d'absorption spécifique en joules par kilogramme							
(7) Dans la gamme de fréquences comprises entre 6 et 300 gigahertz, la valeur limite d'exposition relative aux effets sur la santé représente une densité de puissance exprimée en watt par mètre carré							

« Art. R. 4453-4. – Les valeurs déclenchant les actions prévues à la section 5 du présent chapitre sont les suivantes:

1° Valeurs déclenchant l'action liées aux effets biophysiques directs des champs électromagnétiques :

FREQUENCE (f) (1)	VALEURS DECLENCANT L'ACTION						
	Effets biophysiques directs		Pour l'exposition aux champs électriques	Pour l'exposition aux champs magnétiques		Pour les courants induits	
				VA (B _{eff.}) (4)		VA (I _{Leff.}) (5)	
				VA basse (6)	VA haute (6)	Exposition des membres à un champ magnétique localisé	Dans une extrémité quelconque
1 Hz ≤ f < 8 Hz	Effets non thermiques		2x10 ⁴ V.m ⁻¹	2x10 ⁵ /f ² μT	3x10 ⁵ /f μT	9x10 ⁵ /f μT	-
8 Hz ≤ f < 25 Hz				2.5x10 ⁴ /f μT			-
25 Hz ≤ f < 50 Hz				1x10 ³ μT			-
50 Hz ≤ f < 300 Hz			1x10 ⁶ /f V.m ⁻¹	3x10 ⁵ /f μT	9x10 ⁵ /f μT	-	
300 Hz ≤ f < 1,64 kHz						-	
1,64 kHz ≤ f < 2,5 kHz						-	
2,5 kHz ≤ f < 3 kHz			6,1x10 ² V.m ⁻¹	1x10 ³ μT	3x10 ² μT	-	
3 kHz ≤ f < 100 kHz						-	
100 kHz ≤ f < 1 MHz (7)	Effets thermiques		6,1x10 ² V.m ⁻¹ (non thermique et thermique)	1x10 ² μT (non thermique) 2x10 ⁶ /f μT (thermique)	3x10 ² μT	-	
1 MHz ≤ f < 10 MHz (7)						-	
10 MHz ≤ f < 110 MHz						-	
110 MHz ≤ f < 400 MHz			61 V.m ⁻¹	0,2 μT	-	100 mA	
400 MHz ≤ f < 2 GHz			3x10 ⁻³ f ^{1/2} V.m ⁻¹	1x10 ⁻⁵ f ^{1/2} μT	-	-	
2 GHz ≤ f < 300 GHz			1,4x10 ² V.m ⁻¹	4,5x10 ⁻¹ μT	-	-	

(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz)

(2) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition aux champs électriques sont des valeurs d'intensité de champ électrique exprimées en volt par mètre.

(3) Sur la gamme de fréquences comprises entre 1 et 400 hertz, pour une exposition à des champs électriques, la valeur déclenchant l'action permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sensoriels et aux effets sur la santé mentionnées à l'article R. 4453-2

(4) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition à des champs magnétiques sont des valeurs d'induction magnétique exprimées en microtesla

(5) La valeur déclenchant l'action pour les courants induits est exprimée en milliampère

(6) Sur la gamme de fréquences comprises entre 1 et 400 hertz, pour une exposition aux champs magnétiques, la valeur déclenchant l'action basse permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sensoriels pour une exposition localisée de la tête tandis que la valeur déclenchant l'action haute permet de respecter les valeurs limites d'exposition relatives aux effets sur la santé mentionnées à l'article R. 4453-2

(7) Dans la gamme de fréquences comprises entre 100 kilohertz et 10 mégahertz, les effets thermiques et non thermiques agissant concomitamment pour les expositions à des champs électriques et à des champs magnétiques, les valeurs déclenchant l'action pour les deux types d'effets et les deux types de champs doivent être considérées

2° Valeurs déclenchant l'action liées à certains effets indirects des champs électromagnétiques :

FREQUENCE (f) (1)	VALEURS DECLENCANT L'ACTION			
	pour le risque d'interférence avec des dispositifs actifs implantés	pour le risque d'attraction et de projection dans le champ périphérique de source de champs intenses (> 100 mT)	pour la limitation du risque de décharges d'étincelles	pour un courant de contact d'état stable
	AL(B ₀) (2)	AL(B ₀) (2)	VA (E _{eff.}) (3)	VA (I _c) (4)
0 Hz ≤ f < 1 Hz	0,5 mT	3 mT	-	1 mA
1 Hz ≤ f < 25 Hz	-	-	2x10 ⁴ V.m ⁻¹	
25 Hz ≤ f < 2,5 kHz	-	-	5x10 ³ /f V.m ⁻¹	
2,5 kHz ≤ f < 3 kHz	-	-	1,7x10 ² V.m ⁻¹	0,4 f mA
3 kHz ≤ f < 100 kHz	-	-		40 mA
100 kHz ≤ f < 10 MHz				
10 MHz ≤ f ≤ 110 MHz	-	-	-	

(1) La fréquence f est exprimée en hertz (Hz) à l'exception de la valeur déclenchant l'action pour les courants de contact dans la gamme de fréquences comprises entre 2.5 et 100 kilohertz où elle est exprimée en kilohertz

(2) Les valeurs déclenchant l'action pour une exposition à des champs magnétiques statiques sont des valeurs d'induction magnétique exprimées en millitesla

(3) Les valeurs déclenchant l'action pour la limitation du risque de décharges d'étincelles sont des valeurs d'intensité de champ électrique exprimées en volt par mètre

(4) Les valeurs déclenchant l'action pour les courants de contact sont exprimées en milliampère



p 62 63 : Mesures de bruit pour l'Europe

A1.1.3.2 Mesures de bruit actualisées pour l'Europe

En juin 2002, le Groupe de travail Spectrum Engineering (SE) du Comité des communications électroniques (CCE) de la CEPT a demandé au FM22 du CCE, dans une note de liaison, de mener une campagne européenne de mesures dans les bandes de fréquences kilométriques, hectométriques et décimétriques afin d'évaluer la validité des niveaux de bruit de fond figurant dans la Recommandation UIT-R P.372-8. Cette demande visait à aider son équipe projet SE35 dans son travail technique sur la compatibilité entre les systèmes de transmission par câble et les services radioélectriques.

La Recommandation UIT-R P.372 9 a été très récemment révisée (en 2007), mais les chiffres relatifs au bruit de fond n'ont pas été modifiés. Or les résultats concernant le bruit artificiel reposent toujours sur une analyse réalisée dans les années 70, principalement à partir de mesures effectuées aux Etats-Unis. De plus, selon plusieurs études, le bruit de fond aurait légèrement augmenté. Il est donc essentiel de disposer de valeurs exactes et actualisées du niveau de bruit de fond.

p 65 : Mécanismes de propagation

A1.2 Mécanismes de propagation

A1.2.1 Propagation en champ proche et propagation par l'onde de sol

Dans le cas des CPL, la multiplicité des sources de rayonnement que constituent les lignes électriques nécessite d'évaluer le rayonnement à partir d'une portion générique du réseau global reliée à un point d'injection. La mise en œuvre d'un ensemble de modélisation tel que le code électromagnétique numérique (NEC) permet d'effectuer des évaluations à des distances inférieures à 1 km au minimum. Pour évaluer les niveaux de puissance rayonnée à des distances supérieures ou égales à 1 km, là où apparaît la propagation par l'onde de sol, les niveaux d'intensité du champ peuvent être calculés à l'aide des courbes figurant dans la Recommandation UIT-R P.368⁹, pour des fréquences inférieures ou égales à 30 MHz. GRWAVE peut être utilisé sur l'ensemble de la gamme de fréquences qui nous occupe, jusqu'à 80 MHz au minimum. Pour obtenir une copie de GRWAVE, le lecteur pourra se reporter à la page «Logiciels» de la Commission d'études 3 des radiocommunications¹⁰.

Pour des distances supérieures, en visibilité directe, au-dessous ou au-dessus de la ligne électrique, on pourra se reporter à la Recommandation UIT-R P.525, et pour des fréquences supérieures, à la Recommandation UIT-R P.1546.

9 - RECOMMANDATION UIT-T G.9901 (04/2014)



p 2 :

[UIT-T G.9903] Recommandation UIT-T G.9903 (2014), *Emetteurs-récepteurs OFDM à bande étroite utilisant les courants porteurs en ligne – G3-PLC*.

[CISPR 16-1] CEI CISPR 16-1 (1993), *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 1: Appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques*.

[CISPR 16-2] CEI CISPR 16-2 (1996), *Spécifications des méthodes et des appareils de mesure des perturbations radioélectriques et de l'immunité aux perturbations radioélectriques – Partie 2: Méthodes de mesure des perturbations et de l'immunité*.

[EN50065-1] CENELEC EN 50065-1, *Transmission de signaux sur les réseaux électriques basse tension dans la bande de fréquences de 3 kHz à 148,5 kHz – Partie 1: Règles générales, bandes de fréquences et perturbations électromagnétiques*.

[ARIB STD-T84] ARIB STD-T84 Ver. 1.0 (2002), *Power Line Communication Equipment* (10 kHz-450 kHz).

p 3 : Fréquences du CPL G3 CENELEC-A

Tableau A.2 – Paramètres du plan de bande CENELEC-A

Notation	Valeur	Note
F_{DEBUT}	35,9375 kHz	Fréquence inférieure du plan de bande CENELEC-A (numéro de sous-porteuse 23)
F_{FIN}	90,625 kHz	Fréquence supérieure du plan de bande CENELEC-A (numéro de sous-porteuse 58)
Indices PMSC	0 à 22, 59 à 127	Paragraphe 8.4.2.1 de [UIT-T G.9902]

p 8 : annexe B

Tableau B.2 – Paramètres du plan de bande CENELEC-A

	Nombre de sous-porteuses	Première sous-porteuse (kHz)	Dernière sous-porteuse (kHz)
CENELEC-A	36	35,9375	90,625

p 6 : Limites du signal émis

A.3.1 Limites du signal émis

Les méthodes et appareils de mesure utilisés pour la détection des quasi-crêtes, crêtes et valeurs moyennes sont définis dans [CEI 60050-161].

Pour tous les plans de bande CENELEC spécifiés au § A.1.1, les émetteurs-récepteurs [UIT-T G.9902] respectent les limites dans la bande et hors bande du signal émis spécifiées au § 6 de [EN50065-1].

Ces limites sont réputées respectées à partir du moment où le chargement se fait sur le réseau fictif standard indiqué sur la Figure 1 de [EN50065-1], et où la connexion est conforme aux spécifications fournies au § 6 de [EN50065-1], pour les appareils monophasés et triphasés.

p 7 : La tension du signal de sortie mesurée **à l'extérieur** de la largeur de bande spectrale du plan de bande n'excède pas les limites suivantes :

– Dans la gamme de fréquences de 9 kHz à 150 kHz, la limite de la tension du signal de sortie mesurée au moyen d'un détecteur de quasi-crête avec une largeur de bande de résolution de 200 Hz décroît de façon linéaire en fonction du logarithme de la fréquence, de 89 dB (μ V) à 9 kHz, (**ndlr : 28,2 mV à 9 kHz**) jusqu'à 66 dB (μ V) à 150 kHz (**ndlr : 2 mV à 150 kHz**).

– Dans la gamme de fréquences de 150 kHz à 535 kHz, la limite de la tension du signal de sortie mesurée au moyen d'un détecteur de quasi-crête avec une largeur de bande de résolution de 9 kHz décroît de façon linéaire en fonction du logarithme de la fréquence, de 66 dB (μ V) à 150 kHz (**ndlr : 2 mV à 150 kHz**) jusqu'à 60 dB (μ V) à 535 kHz (**ndlr : 1 mV à 535 kHz**).

La définition de la largeur de bande spectrale est illustrée page 9 de la **norme AFNOR EN50065-1 - Mai 2002**, Figure 1.

AFNOR : Association Française de Normalisation

page 9 de la **norme AFNOR EN50065-1** :

6.2.1 Détermination de la largeur de bande

Le spectre du signal de sortie est déterminé par l'utilisation d'un analyseur de spectre équipé d'un détecteur de crête et ayant une largeur de bande de 100 Hz.

L'émetteur doit fonctionner de façon à ce que la largeur de bande et l'amplitude du signal de sortie aient les valeurs maximales autorisées par la spécification du fabricant.

La largeur spectrale (B exprimé en hertz) est définie par la mesure de l'intervalle de fréquences pour lequel le niveau de signal est inférieur de 20 dB à celui de la raie spectrale d'amplitude maximale (voir figure 1).

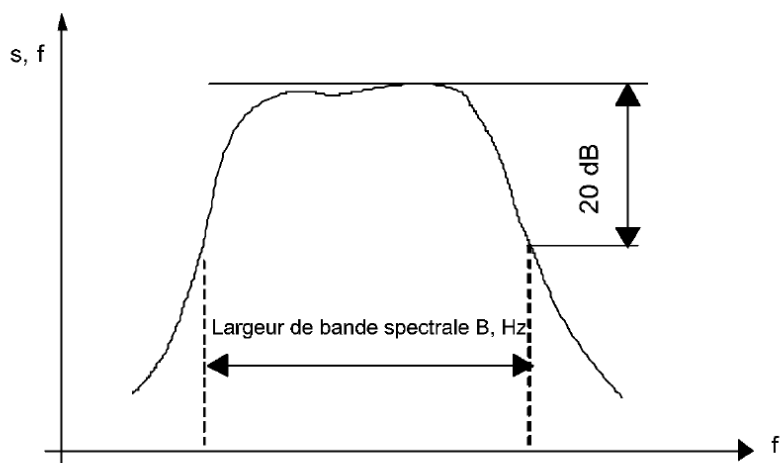


Figure 1 - Mesure de la largeur de bande spectrale

p 11 : Emission parasites

B.3.1 Emissions parasites

Le fabricant a l'obligation de veiller à ce que les émissions parasites soient conformes à la réglementation en vigueur dans le pays où la station est utilisée.

Annexe C

Spécifications de la densité spectrale de puissance pour les émetteurs-récepteurs PRIME

(La présente annexe fait partie intégrante de la présente Recommandation.)

NOTE – La présente annexe contient les spécifications de la densité spectrale de puissance (PSD) relatives à [UIT-T G.9904].

C.1 Introduction

La présente annexe contient les spécifications de la densité spectrale de puissance (PSD) relatives à [UIT-T G.9904], qui définit un système de communications CPL OFDM fonctionnant dans la bande CENELEC-A telle que définie dans le corps principal de la présente Recommandation. L'entité PHY utilise des fréquences de la bande comprise entre 3 kHz et 95 kHz dont l'utilisation est limitée aux distributeurs d'électricité et à leurs titulaires de licence. On sait cependant que les fréquences inférieures à 40 kHz présentent plusieurs problèmes sur les lignes électriques basse tension types, notamment:

- le module d'impédance de charge vu par les émetteurs est parfois inférieur à $1\ \Omega$, principalement sur les noeuds de base au niveau des transformateurs;
- le bruit de fond coloré, toujours présent sur les lignes électriques et résultant de la somme de nombreuses sources de bruit avec une puissance relativement réduite, augmente de façon exponentielle son amplitude vers les basses fréquences;
- les chambres de compteurs posent également problème, car le comportement des consommateurs est réputé avoir un impact plus fort sur les propriétés des canaux à basses fréquences, par exemple le fonctionnement de tout type d'appareils électroménagers engendre une variance dans le temps significative et non prévisible à la fois des caractéristiques de la fonction de transfert et du scénario de bruit.

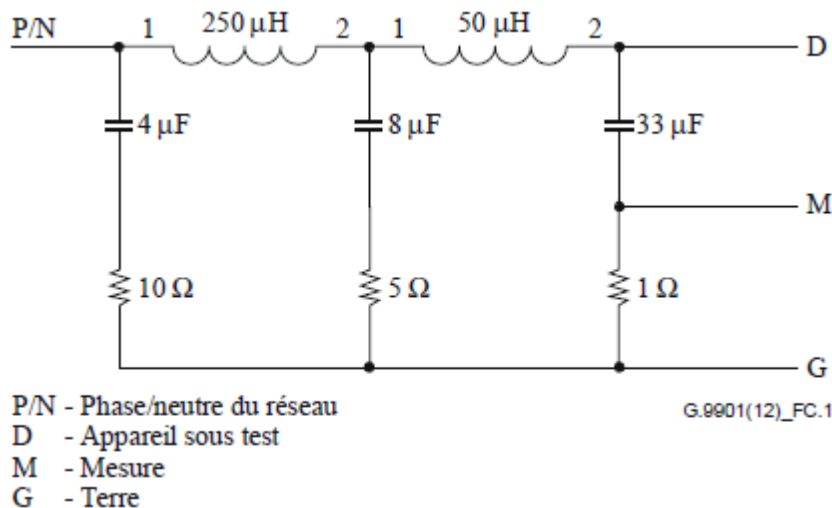
En conséquence, le signal OFDM utilise une largeur de bande de fréquences de 47,363 kHz située sur les hautes fréquences de la bande CENELEC-A.

Le signal OFDM à lui seul utilise 97 sous-porteuses (96 sous-porteuses de données et une sous-porteuse pilote) également espacées avec un court préfixe cyclique.

p 13 : C.4.2 Densité spectrale parasite à l'émission

Le réseau fictif des Figures 4 et 6 de [EN50065-1] est détaillé à la Figure C.1. Il se fonde sur la Figure 5 de [EN50065-1]. On a ajouté un condensateur de $33\ \mu\text{F}$ et une résistance de $1\ \Omega$ de manière à ce que le réseau ait une impédance de $2\ \Omega$ dans la bande de fréquences considérée.

p 14 : Figure C.1 – Réseau fictif standard [EN50065-1] fig. 4 et 6



Les tensions de sortie de l'émetteur sont données comme tension mesurée à la borne de ligne comparativement à la borne de neutre. En conséquence, les valeurs obtenues à partir de l'appareil de mesure sont augmentées de 6 dB (diviseur de tension d'un coefficient 1/2).

Tous les tests sont réalisés dans des conditions normales de charge de trafic.

Dans tous les cas, la densité PSD est conforme à la réglementation en vigueur dans le pays où le système est utilisé.

L'amplificateur de puissance est capable d'injecter dans le noeud de transmission (paramètre S1) un niveau de signal final de 120 dBμVrms (1 Vrms) dans le cas d'un raccordement au réseau fictif de la Figure C.1, comme décrit à la Figure 4 de [EN50065-1] pour les appareils monophasés et à la Figure 6 de [EN50065-1] pour les appareils triphasés qui injectent dans une phase à la fois. Pour les appareils triphasés qui injectent dans les trois phases simultanément, le niveau de signal final est de 114 dBμVrms (0,5 Vrms). Comme mentionné précédemment, les valeurs fournies par l'appareil de mesure sont augmentées de 6 dB pour compenser la perte d'insertion du réseau fictif.

p 14 : C.4.3 Valeurs limites des perturbations par conduction

Des réglementations régionales peuvent s'appliquer. Par exemple, en Europe, les émetteurs doivent respecter les niveaux maximaux d'émission et les niveaux des émissions parasites définies dans le corps principal de la présente Recommandation pour les émissions par conduction sur le réseau électrique en courant alternatif dans les bandes de 3 kHz à 9 kHz et de 95 kHz à 30 MHz. Selon la réglementation européenne, les émetteurs et récepteurs doivent également respecter les limites d'impédance définies dans le corps principal de la présente Recommandation dans la gamme comprise entre 3 kHz et 148,5 kHz.

10 - SPECIFICATION DE LA COUCHE PHYSIQUE CPL G3 Document ERDF

p 1 : Résumé

Ce document présente le bloc de couche physique pour un système de courants porteurs de ligne (CPL) basé sur la technologie OFDM (Multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence), intégré dans la spécification technique AMM G3 d'ERDF.

p 7 : Objectif du CPL-G3

Les courants porteurs de ligne (CPL) sont utilisés depuis de nombreuses décennies, mais un ensemble de nouveaux services et de nouvelles applications nécessitent des taux de transmission de données supérieurs ainsi qu'une fiabilité accrue. Nous savons aussi que le canal de courants porteurs est un support très hostile. Les caractéristiques et paramètres du canal varient selon la fréquence, l'emplacement, l'heure et le type d'équipements branchés dessus. Les régions à basses fréquences (de 10 kHz à 200 kHz) sont plus particulièrement sensibles aux interférences. Outre le bruit de fond, le canal est sujet aux bruits impulsionnels et aux interférences en bande étroite ; des retards de groupe pouvant atteindre plusieurs centaines de microsecondes ont été constatés.

Les spécifications CPL G3 basées sur la technologie OFDM visent sur les objectifs principaux suivants :

1. Fourniture d'une communication robuste dans des canaux de courants porteurs particulièrement difficiles
2. Fourniture d'un taux de transmission de données effectif de 20 kbps en mode normal de fonctionnement
3. Capacité d'encoher des fréquences sélectionnées, autorisant la cohabitation avec une communication à bande étroite S-FSK.
4. Possibilités dynamiques d'adoption de tonalité pour choisir les fréquences sur le canal qui n'ont pas d'interférence majeure, assurant de ce fait une communication robuste

p 9 : Une technique d'évaluation du canal aveugle est utilisée pour l'adaptation des liaisons. Selon la qualité du signal de réception, le récepteur sélectionne le schéma de modulation à employer. En outre, le système s'affranchit des sous-porteuses ayant un mauvais SNR, en ne leur transmettant pas de données.

ndlr : A cet effet, le compteur "aveugle" envoie une série de pulses à puissance maximale ($\pm 700\text{mA}$ env) et ajuste sa puissance d'émission en fonction de la qualité d'échange avec le concentrateur.

p 10 : Paramètres fondamentaux du système

Le CPL G3 est compatible avec la partie de la bande CELENEC-A comprise entre 35,9 et 90,6 kHz. Un OFDM bénéficiant de schémas de modulation DBPSK et DQPSK par porteuse est sélectionné pour prendre en charge un taux de transmission de données jusqu'à 35 kbps, en mode normal de fonctionnement. La modulation DBPSK et DQPSK associée à chaque porteuse simplifie considérablement la conception du récepteur puisque celui-ci ne requiert pas de circuits de suivi pour la détection de la phase de chaque porteuse de façon cohérente. Au lieu de cela, les phases des porteuses du symbole adjacent servent de références pour la détection des phases des porteuses du symbole courant.

p 11 : Le système fonctionne selon deux modes différents : le mode Normal et le mode Robuste.

En mode Normal, le FEC est composé d'un Encoder Reed Solomon et d'un codeur convolutif. Le système accepte également le code Reed Solomon avec une parité de 8 et 16 octets.

En mode Robuste, le FEC est composé d'un Encoder Reed Solomon et d'un codeur convolutif suivi d'un RC (code de répétition). Le code RC répète chaque bit quatre fois, ce qui rend le système plus robuste face aux défauts du canal. Ceci a bien sûr pour effet de réduire le débit d'un facteur 4 environ.

p 26 : fenêtrage : Pour réduire l'émission hors bande et le lobe latéral spectral, un formatage en cosinus élevé est appliqué à tous les symboles de données. Les queues et têtes de symboles successifs se chevauchent et s'ajoutent. La fonction de fenêtrage appliquée à chaque limite de 8 échantillons est une fonction en cosinus élevé.

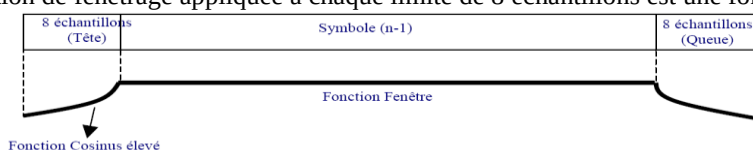


Figure 10- Fenêtrage en cosinus élevé

p 27 : 5.13. Mappage d tonalités adaptatif et contrôle de puissance d'émission

La technologie CPL G3 doit évaluer le SNR (rapport signal sur bruit) du signal reçu des sous porteuses et sélectionner de façon adaptative les tonalités utilisables, la modulation optimale ainsi que le taux de transmission du code (y compris DBPSK, DQPSK et le mode Robuste) pour assurer une communication fiable sur le canal de courants porteurs.

Elle doit également spécifier le niveau de puissance que le transmetteur à distance doit utiliser ainsi que des valeurs de gain à appliquer pour les diverses parties du spectre. La mesure de qualité par tonalité (36 en tout) permet au système de s'affranchir de façon adaptative de toute émission de données sur des sous porteuses dont la qualité s'avère médiocre.

Le système d'indexation de carte de tonalités permettant le passage de l'index du récepteur au transmetteur et réciproquement, autorise le récepteur à sélectionner de façon adaptative les sous porteuses à employer pour la transmission et celles qui serviront pour l'envoi de données fictives que le récepteur doit ignorer.

Le mappage adaptatif de tonalité vise à permettre au récepteur G3 CPL d'obtenir le plus grand débit possible que les conditions existantes du canal puissent offrir. Pour réaliser cet objectif, le récepteur doit informer le transmetteur distant sur les tonalités à utiliser pour l'envoi des bits de données et sur celles qui serviront pour l'envoi de bits de données fictives que le récepteur doit ignorer.

Le récepteur (compteur Linky) doit également informer le transmetteur distant (concentrateur Enedis) sur le volume d'amplification ou d'atténuation à appliquer sur chacune des tonalités.

La station source peut demander à une station de destination d'évaluer une condition du canal en définissant un bit TMR du FCH. La station de destination doit évaluer cette liaison particulière de communication entre deux points et choisir des paramètres PHY optimaux. Ces informations retourneront auprès de l'expéditeur sous la forme d'un tableau de paramètres appelé "Carte de répartition de tonalités".

p 28-29 : Détails de certains paramètres de la carte de répartition de tonalités

MOD : Paramètre spécifiant le type de modulation désiré. La station de destination calcule le SNR (rapport signal sur bruit) du message "*Demande de carte de répartition de tonalités*" qu'il reçoit de la station source et décide parmi les 4 modes de modulation (DBPSK, DQPSK, Robuste ou Reserved) lequel il veut que la source utilise lors de l'envoi de la prochaine trame de données ou du message "*Demande de carte de répartition de tonalités*".

TXRES : Paramètre spécifiant la résolution du gain d'émission correspondant à une étape de gain.

TXGAIN : Paramètre indiquant au transmetteur distant le volume total du gain à appliquer à ses signaux émis. La valeur de ce paramètre doit spécifier le nombre total d'étapes de gain nécessaires. Le récepteur calcule le niveau du signal reçu et le compare à un VTARGET (niveau de réception désiré pré défini). *La différence en dB entre les deux valeurs est mappée à une valeur de 5 bits qui spécifie l'accroissement ou la diminution du volume de gain que le transmetteur distant doit appliquer à la prochaine trame à émettre.

La valeur "0" du bit le plus significatif indique une valeur de gain positive, donc un accroissement du gain du transmetteur. En revanche, une valeur "1" indique une valeur de gain négative, et une diminution du gain du transmetteur. TXGAIN = 0 informe le transmetteur qu'il doit utiliser la même valeur de gain que celle utilisée pour la trame précédente.

TM : Paramètre spécifiant la carte de tonalités. Le récepteur évalue la qualité par tonalité du canal et met en correspondance chaque tonalité avec une valeur sur un bit. Si cette valeur est "0", le transmetteur distant doit alors émettre des données fictives sur la sous porteuse correspondante ; si elle est à "1" des données valides doivent alors être émises sur la sous porteuse correspondante.

TXCOEF : Paramètre spécifiant le gain du transmetteur pour chaque section de 10 kHz du spectre disponible. Le récepteur mesure l'atténuation dépendante de la bande de fréquence du canal et peut demander au transmetteur de compenser cette atténuation par une augmentation de la puissance d'émission sur des sections du spectre subissant une atténuation afin de corriger l'affaiblissement du signal reçu.

Chaque section de 10 kHz est mise en correspondance avec une valeur sur 4 bits. Si le bit le plus significatif indique "0", la valeur de gain est positive et donc un accroissement du gain du transmetteur est demandé pour cette section. S'il indique "1", la valeur de gain est négative et une diminution du gain du transmetteur est demandée pour cette section. La mise en oeuvre de ce dispositif est facultative et est prévue dans le cas d'un canal sélectif en fréquence. Si ce dispositif n'est pas mis en application, la valeur zéro devrait être employée.

p 30 : 5.14. Passage du transformateur HTA/BT

Le système G3 CPL doit être en mesure de communiquer sur les lignes électriques basse tension, ainsi que sur les lignes électriques haute tension. En fonctionnement sur les lignes électriques haute tension, le système doit être capable de communiquer avec les lignes basse tension.

Le récepteur côté basse tension doit être capable de détecter le signal émis après que celui-ci ait subi une importante atténuation résultant du passage par un transformateur HTA/BT. Lorsque le signal passe par le transformateur, celui-ci subit une importante atténuation globale de son niveau de puissance ainsi qu'une atténuation dépendante de la fréquence qui atténue particulièrement les fréquences plus élevées. Le transmetteur et le récepteur doivent tous les deux posséder un mécanisme de compensation de cette atténuation.

L'émetteur doit avoir la capacité d'ajuster son niveau de signal ainsi que la forme de son spectre de puissance, tandis que le récepteur doit avoir un AGC (Automatic Gain Control) à la fois analogique et numérique afin d'avoir suffisamment de gain pour compenser l'atténuation.

Outre le fait qu'il soit en mesure de fonctionner en mode normal, le système GPL G3 doit pouvoir fonctionner comme un répéteur. Si configuré en mode "répéteur", le système CPL G3 doit décoder les trames reçues du canal et les ré-émettre ensuite à un niveau de signal supérieur pour compenser partiellement l'atténuation introduite par le transformateur. Lorsqu'il est nécessaire, le répéteur doit être placé côté BT du transformateur HTA/BT.

5.15. Coupleur HTA

Le modem CPL G3 s'interface avec la ligne électrique HTA au moyen d'un dispositif de couplage CPL que l'on peut identifier comme un filtre passe-haut. Il a pour objet de permettre le passage du signal CPL tout en rejetant la fréquence du circuit électrique et en protégeant les équipements de communication contre la tension du circuit électrique et les tensions transitoires résultant d'opérations de commutation.

Pour le modèle CPL G3, résoudre les problèmes d'adaptation d'impédance est très important dans le sens d'un transfert d'un maximum de puissance vers le terminal d'entrée du signal des lignes de distributions intérieures du courant HTA. Il est recommandé de vérifier tout transformateur utilisé en mesurant les caractéristiques de transmission et de réflexion au travers d'un analyseur réseau vectoriel.

L'interface de couplage proposée doit agir comme une interface entre le dispositif CPL (avec **31 V** et une impédance d'environ **2 Ω**) - **ndlr** : soit **480 Watts** ?! - et le support HTA (avec 20 kV et impédance comprise entre 75 Ω et 175 Ω)

p 34 : 6. Spécifications électriques du transmetteur

6.1. Mesure du niveau de sortie.

Le niveau de sortie de l'émetteur CPL G3 doit être conforme à la norme **EN50065-1**, le niveau de signal doit être mesuré avec un détecteur de crête en prenant une largeur de bande de **200 Hz**, aucune partie du spectre du signal ne doit dépasser **120 dB µV**. **ndlr** : 1 V.

ndlr : Des relevés sur site de CPL **G1**, et non G3, ont mesurés 5 volts. Voir l'étude "[Champ Magnétique CPL toulouse et DataLog Balma 2018 03 31 v1.pdf](#)" sur le site de Robin des toits - en direct du labo.

6.2. Masque du spectre d'émission

La couche PHY du CPL G3 est dimensionnée pour avoir des encoches programmables à certaines fréquences pour :

- a) S'affranchir de certaines fréquences reçues par des éléments de contrôle de ligne électrique destinés à d'autres applications.
- b) Autoriser la cohabitation avec des systèmes S-FSK en conformité avec la norme **CEI 61334-5-1**.
- c) Permettre une interopérabilité avec d'autres systèmes potentiels agissant sur la ligne électrique.

Le transmetteur doit utiliser un dispositif approprié pour l'insertion d'encoches profondes dans le spectre. Notamment, deux fréquences référencées dans la norme **CEI 61334-5-1** comme les fréquences fM et fS de marque et d'espace qui doivent être encodées pour cohabiter avec des systèmes S-FSK.

Ainsi, le modem OFDM ne doit transmettre aucun signal entre les fréquences S-FSK, c'est-à-dire la bande **63 kHz à 74 kHz**. Par conséquent, **11** sous porteuses ne peuvent pas transmettre de données sur les **36** sous porteuses disponibles. Il reste **25** sous porteuses pour la transmission de données.

Rédigé par le Docteur Pascale CHOUCROUN pascale.choucroun@chu-brest.fr

Centre de pathologies environnementales et professionnelles - CHRU de Brest

p 17 :

***A noter :** le recrutement d'une étude prospective a été lancé en avril 2010. Cette étude nommée COSMOS a pour objectif de suivre pendant 20 à 30 ans environ 250.000 européens afin de déterminer les conséquences sanitaires de l'utilisation du téléphone mobile. Ce type d'étude, si sa méthodologie est correcte, est le seul à pouvoir apporter enfin des réponses aux incertitudes actuelles.*

Pour en savoir plus : site COSMOS : http://www.ukcosmos.org/faqs_1.html

p 17 : Exposition aux ELF et limite légale du courant induit

Pour l'exposition aux champs ELF

Les observations les plus remarquables sont :

- la perturbation des flux calciques transmembranaires, particulièrement dans les neurones. Cet effet est retrouvé seulement pour certaines fréquences (16 Hz et ses harmoniques) : c'est "l'effet fenêtre" et on le retrouve aussi avec les champs hyperfréquences modulés en ELF pour les mêmes fenêtres de fréquence de modulation (voir plus bas)
- des interactions avec la membrane cellulaire et des modifications de plusieurs fonctions du métabolisme cellulaire
- une altération du nombre ou de l'efficacité des cellules immunitaires
- des modifications plus ou moins transitoires au niveau du métabolisme et de la sécrétions des hormones ou des neurotransmetteurs (mélatonine, sérotonine, dopamine) sans troubles cliniques nettement associés.

***A noter :** une altération de la synthèse nocturne de mélatonine a été obtenue chez le rat pour des expositions à des champs électriques inférieurs à 10 kV/m, ce qui correspond à des densités de courant induit inférieures à 2 mA/m²... 2mA/m² est la valeur choisie comme restriction de base (valeur à ne pas dépasser) par la législation en vigueur actuellement. Le moins que l'on puisse dire, c'est que la marge de sécurité est faible...*

Actuellement, seules certaines nuisances comme les courants induits dans le corps humain par les basses fréquences, les réactions humaines liées aux courants de contact et les effets thermiques dans les tissus provoqués par les hautes fréquences sont unanimement reconnues.

D'autre part, il ne faut jamais perdre de vue que les intérêts économiques ou sociétaux en jeu, de même que la "relation" individuelle que chacun entretient avec les objets qui sont présents dans sa vie, choisis ou imposés, sont des éléments importants de subjectivité qui peuvent venir "polluer" l'analyse rationnelle des risques, soit pour les minimiser, soit pour les surévaluer.

Au total, des études complémentaires sont nécessaires pour évaluer précisément le risque sanitaire à long terme de l'exposition aux champs électromagnétiques. Certaines sont en cours mais ne donneront de résultats que dans plusieurs années, comme, par exemple, une étude prospective européenne sur l'utilisation du mobile.

L'OMS effectue actuellement une évaluation sur les risques sanitaires et environnementaux liés aux champs électriques et magnétiques. La publication du rapport final, initialement prévue pour 2007, puis 2012, est toujours attendue à ce jour.

http://www.developpement-durable.gouv.fr/spip.php?page=article&id_article=24346

Remarque : un rapport du Copil, remis au gouvernement en août 2013, conclut que pour abaisser l'exposition aux champs RF en-dessous de 0,6 V/m tout en maintenant une couverture "satisfaisante", il faudrait tripler le nombre d'antennes relais.

En juillet 1999, une recommandation européenne (n° 1999/519/CE/12.07.99) relative à la limitation de l'exposition du public aux champs électromagnétiques a été adoptée. Elle est fondée sur les recommandations de la Commission Internationale de Protection contre les Rayonnements non ionisants (ICNIRP) et s'inspire des orientations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Les niveaux de référence retenus pour la population générale par cette recommandation sont les valeurs recommandées par l'OMS et l'ICNIRP :

- pour un courant alternatif de 50 Hz :
 - 100 μ T pour la densité de flux magnétique
 - 5.000 volt/mètre (V/m) pour le champ électrique
- pour les radiofréquences :
 - densité de puissance : 4,5 et 9 W/m² à 900 MHz et 1.800 MHz respectivement
 - DAS des téléphones mobiles : 0,08 W/kg pour le corps entier, 4 W/kg pour le DAS localisé aux membres, 2 W/kg pour le DAS localisé à la tête
 - champ électrique : 41 V/m et 58 V/m à 900 et 1.800 MHz respectivement

Ces valeurs permettent théoriquement de respecter la restriction de base pour la densité de courant fixée à 2 mA/m².

Le décret 2002-775 du 3 mai 2002 (JO du 5 mai 2002) et l'arrêté du 8 octobre 2003 transposent cette recommandation dans le droit français.

"Principes physiques et compatibilité électromagnétique"

Mémoire de Pascal Pagani soumis le 21Juillet 2016 Télécom Bretagne, 2016.



Pascal Pagani Pascal Pagani received the M.Sc. degree in communication systems and signal processing from the University of Bristol, Bristol, U.K., in 2002 and the Ph.D. degree in electronics from the Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, Rennes, France, in 2005. He is currently an Associate Professor at the graduate engineering school Telecom Bretagne, Brest, France, and is a member of the Lab-STICC laboratory (UMR CNRS 6285) dedicated to information and communication science.

Prior to joining Telecom Bretagne in 2012, he was with France Telecom Orange Labs, where he conducted research on UWB propagation channel modeling, short range wireless systems design, and development of in-home wireline communications. He participated in the ETSI Specialist Task Force 410 for the experimental assessment of the MIMO PLC transmission channel. He is the author of more than 50 publications in the fields of wireless and wired communication. His current research interests are in the field of radio and wireline transmission, particularly long-haul radio wave propagation and advanced PLC.

Dr. Pagani was a recipient of the Grand Prix Général Ferrié in 2013 for his research on transmission over power lines.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01347734>

p 5 : Les systèmes CPL actuels utilisent des fréquences jusqu'à 86 MHz, et la propagation du signal sur les câbles de cuivre entraîne une forte atténuation avec la distance et la fréquence, ainsi que l'apparition de trajets multiples.

Le chapitre 4 est dédié aux contraintes CEM des systèmes de communication sur les réseaux d'énergie [40]. En termes d'émission électromagnétique, la bande utilisée par les systèmes CPL est déjà occupée par d'autres services (radio amateur, radiodiffusion en ondes courtes), et les organismes de régulation imposent une stricte limitation de puissance de transmission [41].

[41] B. PRAHO, M. TLICH, G. AVRIL, et al., « Electromagnetic compatibility issues related to Power Line Communications », Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), vol. 86, no 5, ISSN 0033-2097, mai 2010

p 14 : § 1.4.1 CPL à bande étroite

La spécification **G3-PLC** a été développée au sein du consortium G3-PLC Alliance, regroupant des opérateurs d'énergie, des intégrateurs et des fabricants de composants. Ce système opère dans les bandes de **35,9 à 90,6** kHz en Europe et dans différentes sous bandes entre 150 kHz et 500 kHz suivant les réglementations des Etats-Unis et du Japon. La version européenne utilise une modulation OFDM sur 36 porteuses.

Le G3-PLC code l'information sur la différence de phase entre symboles successifs dans le domaine temporel. Les constellations employées sont différentielles, de type Binary Phase Shift Keying (BPSK), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) et 8-Phase Shift Keying (PSK). Le code correcteur d'erreur utilise un code concaténé de Reed-Solomon et convolutif de rendement $R = \frac{1}{2}$.

Des modes robustes sont également définis avec des répétitions d'un facteur 4 à 6. Ces composants permettent d'obtenir un débit maximal sur la couche PHY de **233 kbit/s**.

Un groupe d'industriels similaires, le consortium **PRIME Alliance** a développé en parallèle la spécification Powerline Intelligent Metering Evolution (**PRIME**). Cette spécification fonctionne sur la bande de **42 à 88.9** kHz. La modulation est de type OFDM sur 97 porteuses. Les constellations utilisées sont de type BPSK, QPSK et 8-PSK différentielles. Le code correcteur d'erreur est un code convolutif de rendement $R = \frac{1}{2}$. Cette spécification n'offre pas de mode robuste, mais une retransmission de type ARQ optimisée pour lutter contre le bruit impulsif. Le débit maximal sur la couche PHY est de **128,6 kbit/s**

A la différence de **G3-PLC** qui code l'information sur la différence de phase entre symboles successifs dans le domaine temporel, **PRIME** réalise une modulation différentielle dans le domaine fréquentiel, entre porteuses successives. Les spécifications G3-PLC et PRIME ont été respectivement intégrées dans les standards **UIT-T G.9903** [74] et **UIT-T G.9904** [75]. La série de standards est complétée par la spécification **IUT-T G.9902** [76], proche de **G3-PLC**.

p 17 :

En mettant à profit l'installation existante du réseau électrique, la technologie CPL permet de réaliser des réseaux de communication avec un très faible coût d'infrastructure. Si les premiers systèmes UNB utilisaient de très basses fréquences en-dessous de 3 kHz, les débits associés ne permettaient pas d'envisager des réseaux de transfert de données.

Aujourd'hui, deux types de systèmes sont développés. Les technologies CPL-NB opèrent dans la bande de fréquence de 3 à 500 kHz, et sont principalement utilisées sur les réseaux de distribution BT pour mettre en œuvre des applications de type *Smart Grid*. L'application principale consiste à automatiser le relevé des compteurs électriques des abonnés. D'autres applications sont possibles, comme les réseaux de domotique pour l'automatisation des capteurs dans les bâtiments, ou encore la gestion de l'éclairage public. Ces applications requièrent des débits modérés de l'ordre de quelques dizaines de kbit/s, et ce sont la robustesse et la portée de ces systèmes qui orientent les développements.

La problématique particulière du rayonnement involontaire des réseaux CPL et de sa mitigation est traitée dans le chapitre 5. Enfin, le chapitre 6 est dédié la consommation électrique des modems CPL et étudie des pistes pour augmenter leur efficacité énergétique.

p 35 :

L'une des principales évolutions récentes dans le domaine du CPL-BB concerne l'application de la technologie *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) aux communications sur réseaux d'énergie [32]. La technique MIMO, initialement conçue dans domaine de la radio, consiste à utiliser plusieurs antennes à l'émission et à la réception, ce qui offre un gain important en termes de capacité de transmission. J'ai proposé d'étudier l'adaptation du MIMO au réseau électrique, à travers une thèse démarrée en 2008 [38]. Une transmission CPL classique utilise deux câbles électriques, la phase (P) et le neutre (N), pour réaliser une transmission différentielle. En utilisant de façon complémentaire le câble de terre (T), il est possible d'exploiter plusieurs modes de transmission à l'émetteur et au récepteur, créant ainsi un canal MIMO. La mise en œuvre de cette technique est détaillée dans la section 3.1.

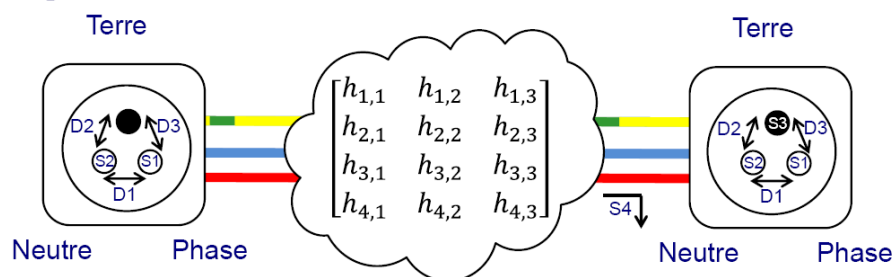


FIG. 3.1 – Illustration de la transmission CPL MIMO sur un réseau électrique domestique.

	Minimum	Moyenne	Maximum
Capacité C_{MIMO} (Gbit/s)	4.12	4.32	4.50
Gain en capacité $\frac{C_{MIMO}}{C_{SISO}}$	1.87	1.88	1.90

TAB. 3.1 – Gain de capacité CPL MIMO évalué sur la campagne Orange Labs.

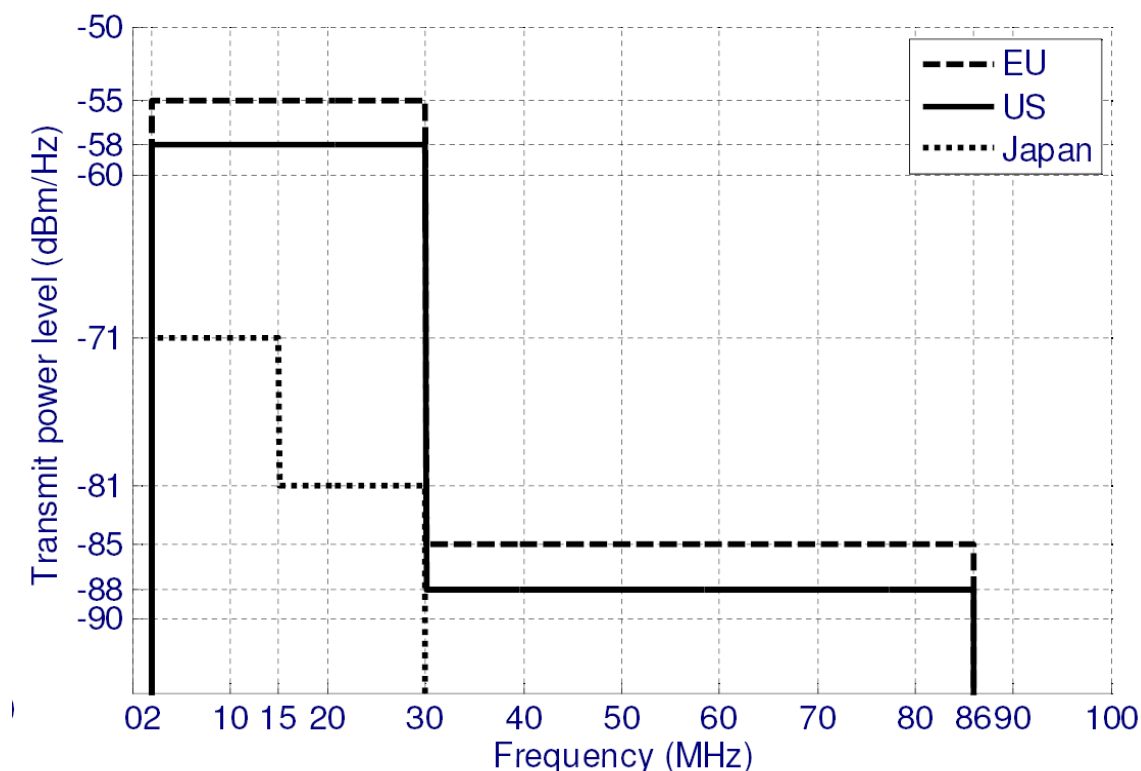
p 58 : Chapitre 4 Compatibilité électromagnétique des systèmes CPL

La Compatibilité Electro-Magnétique (CEM) traite des émissions et de l'immunité des différents systèmes qui partagent la même bande de fréquence. Elle est définie comme l'aptitude d'un système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire lui-même des perturbations intolérables pour d'autres systèmes. Lorsqu'un équipement est déployé, les normes de CEM assurent d'un part que les émissions produites ne perturbent pas les autres services. D'autre part, elles spécifient un niveau de tolérance pour un bon fonctionnement de l'équipement en présence d'un certain niveau d'interférence électromagnétique

En Europe, les normes de CEM pour les systèmes CPL-BB sont établies par le Comité Européen de Normalisation en Electronique et en Electrotechnique (CENELEC) dans le standard **EN 50561-1**.

On y trouve les recommandations suivantes :

- Une procédure de mesure des émissions CEM au port du système CPL lorsque aucune communication n'est établie
- Une seconde procédure de mesure des émissions CEM au port du système CPL lorsqu'une communication normale est établie
- Une protection permanente (ou static notching) de certaines parties du spectre radio
- Une procédure de protection adaptative (ou dynamic notching) pour une protection cognitive des fréquences de certains services ou station radios
- Une procédure de **gestion adaptative de la puissance transmise**
- Une [limite générale sur la DSP](#) du signal injecté de - 55 dBm/Hz (EU)



p 59 : fig 4.2 Comparaison des réglementations en Europe, aux Etats-Unis et au Japon

p 63 : Ajustement adaptatif de la puissance CPL émise

Dans la pratique, l'impédance d'entrée du réseau varie fortement en fonction de la fréquence et pour différentes configurations de réseau électrique. La technique d'optimisation de puissance consiste à évaluer l'impédance d'entrée du réseau électrique par une mesure locale de paramètre S au niveau de l'émetteur.

Le modem compense alors la désadaptation d'impédance en choisissant une puissance de sortie optimale tout en garantissant le respect des masques d'émission réglementaires.

p 67 : Techniques de mitigation des émissions par retournement temporel

La technologie CPL permet de transmettre des données à des débits de l'ordre de plusieurs centaines de Mbit/s en réutilisant l'infrastructure des câbles électriques. Les systèmes actuels émettent dans la bande de 2 à 28 MHz, voire jusqu'à 86 MHz pour les systèmes les plus récents.

Le réseau électrique n'a pas été initialement conçu pour transmettre des signaux à haute fréquence. Ainsi, les systèmes CPL génèrent un rayonnement électromagnétique involontaire, susceptible d'interférer avec d'autres systèmes de transmission, **comme la radiodiffusion sur ondes courtes**, ou les **communications radio amateur**, - **ndlr** ainsi que les grandes ondes en modulation d'amplitude par le CPL Linky -.

Pour cette raison, le niveau d'émission des systèmes CPL est réglementé par des normes précises, développées au sein d'organismes comme le CISPR ou le CENELEC.

Afin de minimiser les interférences entre systèmes et d'améliorer leurs performances, plusieurs propositions de mitigation des émissions involontaires ont été présentées dans la littérature. Les méthodes mises en oeuvre doivent répondre à deux buts. D'une part, il serait intéressant de focaliser l'énergie transmise au niveau du récepteur. D'autre part, les méthodes de mitigation doivent diminuer le niveau de signal reçu en tout point à l'exception du récepteur. Ces deux objectifs apparaissent comme des caractéristiques d'une technique de transmission déjà connue dans le domaine de la radio : le Retournement Temporel (RT) [184].

p 75 :

Les prochaines étapes de cette étude consisteront à établir des protocoles pratiques de mise en oeuvre pour intégrer ces techniques dans les futurs standards CPL. D'autre part, il serait intéressant d'analyser l'effet du RT sur d'autres technologies de communication filaire, comme les systèmes CPL-NB utilisées pour les réseaux de distribution Smart Grids dans les fréquences inférieures à 500 kHz, ou encore les technologies DSL pour la transmission haut débit sur les réseaux téléphoniques.

ndlr : Cette technique ne fonctionne pas avec des récepteurs multiples en grappe comme le système Linky

p 78 : Chapitre 6 Communications CPL et efficacité énergétique

La problématique de l'impact environnemental des TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) est une thématique de recherche en pleine croissance. Un certain nombre d'initiatives sont prises pour réduire l'impact écologique de l'industrie des TIC.

Aujourd'hui, plus de 30% de la consommation électrique du domicile (hors chauffage et production d'eau chaude) sont dus au matériel informatique et audiovisuel. La consommation du secteur des TIC représentait 7,3% de la consommation électrique française en 2008. Cette part va s'accroître dans les années à venir en raison de l'explosion du nombre de terminaux connectés dans le domicile et de l'évolution des usages.

On peut anticiper une régulation plus contraignante dans les années à venir, avec la mise en place par exemple d'une fiscalité écologique. Un rapport de l'ADEME, "Prix des énergies pour l'utilisateur - Secteur de l'habitat, 1973 - 2011 », Document technique, ADEME Franche-Comté, 2010" indique que le prix de l'électricité a augmenté de 20% en France en seulement 10 ans. Il est réaliste d'envisager une accélération de cette augmentation. Un doublement du prix de l'électricité en 5 ans s'est produit récemment dans plusieurs pays d'Europe (Espagne, Pologne, Slovaquie).

Dans un avenir proche, on peut anticiper une forte pénétration des technologies de connectivité WiFi, CPL et optique dans le domicile. Dans notre scénario, la famille dispose du matériel suivant : une passerelle résidentielle, un ordinateur principal, plusieurs terminaux mobiles (un ordinateur portable, 2 tablettes et 4 smartphones), 4 écrans munis de décodeurs vidéo, et un serveur de sauvegarde (NAS).



La consommation annuelle de ce foyer pour l'utilisation de son réseau local domestique est de **272 kWh/an**. En optimisant l'efficacité énergétique de ces systèmes on peut anticiper une baisse significative de la consommation des équipements, que nous estimons dans cet exemple à 30% pour le mode actif et à 10% pour le mode veille. La consommation annuelle du foyer pour l'utilisation du RLD sera donc de **221 kWh/an**, soit une économie de **51 kWh/an**.

Sur l'ensemble des foyers français, on peut estimer que l'optimisation des équipements contribuera à réduire la consommation électrique de **1 TWh/an**. Ce gain en consommation représente 2 mois d'un réacteur nucléaire de 900 MW, ou encore **12%** des **8 TWh** générés par l'ensemble des stations hydroélectriques françaises par an. A noter également, le gain en consommation se réalise au moment des pics de consommation, ce qui contribuera à lisser la demande en énergie.

ndlr : Le système Linky prévoit **35 millions de compteurs** consommant chacun **6 VA**. S'ajoutent **750000** concentrateurs consommant environ **100 W** chacun avec leurs émetteurs GSM qui retransmettent en permanence les données collectées ... avec pollution électromagnétique.

Le bilan énergétique de ce système Linky est estimé aujourd'hui à **2,5 TVAh**, soit **5 mois** d'une tranche de réacteur nucléaire, à comparer au gain escompté ...

p 93 : Technologies de communication pour le **Smart Grid** : CPL et radio

Au-delà des applications liées au réseau électrique, le développement du **Smart Grid** a pour objectif de connecter tous les réseaux de distribution d'énergie ou de ressource naturelle : gaz, réseau de chaleur, eau. Les différents équipements doivent pouvoir communiquer à de faibles débits et de manière fiable et robuste dans un environnement particulier, ce qui constitue un nouveau paradigme pour les technologies d'accès au réseau.

Dans ce cadre, il est primordial d'étudier les technologies de connectivité les plus adaptées à ce type de réseau. La technologie **CPL-NB** (narrow band) est indiquée pour les réseaux d'énergie électrique. Différentes spécifications et standards sont actuellement développés pour cet usage : G3-PLC, PRIME, IEEE 1901.2, ITU-T G.990x.

A partir de la caractérisation de l'environnement de propagation, des innovations pourront être proposées sur la couche PHY de ces systèmes afin d'améliorer la fiabilité des communications. En complément du CPL, les technologies radio à faible puissance et longue portée, également appelées Low Power Wide Area (LPWA), sont adaptées pour connecter des systèmes nécessitant une grande autonomie, comme les compteurs d'eau ou de gaz.

Les technologies LPWA développées actuellement comptent la **spécification LoRa**, ou les solutions propriétaires comme **SigFox** ou **Weightless**. Ces technologies opèrent dans les gammes de fréquences libres (par exemple la bande ISM à **868 MHz**) ou encore dans les bandes libérées par les **fréquences de télévision (white spaces)**.

Pour l'optimisation de ces technologies, il sera nécessaire de mettre à jour les caractéristiques du canal de propagation et du bruit associé. Un focus particulier pourra être mis sur les aspects avancés tels que la technologie MIMO, ou les techniques multi-capteurs distribués.

A partir de la connaissance de la physique de la transmission, il sera possible de proposer des optimisations de ces systèmes pour leur utilisation dans le cadre du Smart Grid.

La plus-value d'une étude coordonnée des technologies **CPL et LPWA** consiste à fournir une analyse comparative des différentes technologies d'accès pour le **Smart Grid**, tant dans le domaine filaire que radioélectrique. Il sera ainsi possible de fournir des préconisations sur l'utilisation optimale de ces technologies, de façon indépendante ou conjointe.

p 94 : CEM cognitive et communication coopérative pour les réseaux CPL

Plusieurs pistes de recherches pourront être appliquées aux réseaux CPL à partir des avancées réalisées dans le domaine de la radio cognitive. Une particularité de ces systèmes radio intelligents est de pouvoir évaluer leur environnement, notamment en termes d'occupation du spectre radioélectrique, et de se reconfigurer en conséquence. Ce type de mécanisme est tout à fait adapté au cas de la CEM(Compatibilité Electromagnétique) des systèmes CPL, où la coexistence entre plusieurs services partageant la même bande de fréquence est un enjeu primordial.

Un exemple de CEM cognitive est présent dans le standard **EN50561-1**, où la fonctionnalité **dynamic notching** permet de stopper les émissions CPL dans les bandes occupées par un service de diffusion radio.

13 - UNITES DU CHAMP MAGNETIQUE - CONVERSIONS Tesla, Gauss, Ampère/mètre, dBm

Le champ magnétique est la conséquence de charges électriques (courant) qui se déplacent dans l'environnement.

L'appareil numérique de mesures des champs électromagnétiques exprime les valeurs détectées en Ampères par mètre (A/m), en milli gauss (mG), en micro ou nano Teslas (μT).

L'excitation magnétique est en Ampère par mètre.

1 A/m est rayonné par un courant de 1A ampère dans une spire de 1 mètre de diamètre.

Wikipedia : Unités du champ magnétique

L'unité moderne utilisée pour quantifier l'intensité du champ magnétique est le tesla, défini en 1960¹⁰. C'est une unité dérivée du système SI. On définit un tesla par un flux d'induction magnétique d'un weber par mètre carré :

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}.$$

Pour diverses raisons historiques remontant aux travaux de Charles de Coulomb, certains auteurs préfèrent utiliser des unités hors du système SI, comme le gauss^e ou le gamma^f. On a :

- 1 tesla = 10 000 gauss ;
- 1 tesla = 1 000 000 000¹¹ gamma.

Valeurs du champ Magnétique B

Les valeurs les plus courantes sont exprimées en micro Tesla ou en milli gauss.

1 micro Tesla = 10 milli gauss = 0,8 Ampère par mètre

Exemples :

- > au niveau du matelas d'un lit électrique : 15 mG ou 1,5 μT à 50 Hz
- > à 20 cm d'une lampe de bureau basse tension : 20 mG ou 2 μT à 50 Hz
- > à 10 cm d'un fax : 150 mG ou 15 μT à 50 Hz
- > le champ magnétique terrestre : 5 G ou 50 μT continus

Convertir des dBμA/m en nT

$$1,254 \mu\text{T} = 1 \text{ A/m}$$

$$1 \text{ A/m (H)} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T (B)}$$

$$1,254 \text{ nT} = 1 \text{ mA/m}$$

$$1 \text{ A/m (H)} = 1,254 \mu\text{T (B)}$$

$$1 \mu\text{T} = 0,8 \text{ A/m} \quad \text{<- tiré de 1999/519/CE}$$

$$1 \mu\text{T (B)} = 0,8 \text{ A/m (H)}$$

Conversion entre nanoteslas et dBμA/m :

$$n\text{T} = 1,254 * 10^{\frac{dB\mu A / m}{20}} / 10^6 * 10^3$$
$$n\text{T} = 1,254 * 10^{\frac{dB\mu A / m}{20}} * 10^{-3}$$

et l'inverse

$$dB\mu A / m = 20 * \log_{10} \left(\frac{n\text{T}}{1,254 * 10^{-3}} \right)$$

Ce calcul est utilisé dans les tableaux de l'[annexe 7 de l'arrêté ARCEP du 15 avril 2010](#)

Le dBm

Mesure le rapport d'une puissance en dB à la référence **0 dB = 1mW**.

$$dBm = 10 * \log_{10} \left(\frac{Watt}{10^3} \right)$$

Inversement la puissance en **Watt** se déduit d'une valeur en **dBm** :

$$Watt = 10^{-3} * 10^{\left(\frac{dBm}{10} \right)}$$

La [limitation CENELEC 60651-1](#) définit une densité spectrale de puissance maximale de - 55 **dBm** par hertz pour l'émission CPL.

-55 **dBm / Hz** équivaut à **1,78 µW / Hz**

Le **CPL G3** occupe le spectre entre **35,9 kHz** et **90,6 kHz**.

ndlr : A confirmer

On calcule la puissance émissive totale permise par la limitation **CENELEC 60651-1** comme le produit de la puissance de -55 dBm par la bande passante de la bande de fréquence du **CPL G3** : **97,3 mW**

Champ magnétique et distance de l'émetteur

Un champ magnétique décroît au carré de la distance, en $1/r^2$, "r" étant la distance entre la source et la mesure. Ainsi, l'[annexe 7 de l'arrêté ARCEP du 15 avril 2010](#), définit à 10 m le champ maxi pour le matériel médical :

de 60,25 à 70 kHz : **69 dBµA/m** à 10 m = **3,53 nT** donc à 1 m = **353 nT** et à 25 cm = **5,65 µT**
de 70 à 119 kHz : **42 dBµA/m** à 10 m = **0,157 nT** donc à 1 m = **15,7 nT** et à 25 cm = **250 nT**

13.1 - Conversion des V/m et nanoteslas

Dans le Guide de l'ICNIRP pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques, document **INRS ND 214.-182-01**, rédigé en vue de la rédaction de la recommandation **1999/519/CE** puis le décret **2002-775**, on lit que :

En champ lointain, le modèle d'onde plane constitue une bonne approximation de la propagation du champ électromagnétique.

Les caractéristiques d'une onde plane sont les suivantes :

- les fronts d'onde ont une géométrie plane ;
- les vecteurs *E* et *H* sont perpendiculaires à la direction de propagation ;
- les champs *E* et *H* sont en phase, et le quotient des amplitudes *E/H* est constant dans tout l'espace.

En champ libre :

$$E_{V/m} = Z_{VIDE} * H_{A/m}$$

avec : $Z_{VIDE} = 377 \Omega = 120 * \pi$

*La densité de puissance *S*, puissance par unité de surface normale à la direction de propagation, est liée aux champs électrique et magnétique par les formules :*

$$S_{W/m^2} = E_{V/m} * H_{A/m}$$

et donc :

$$S_{W/m^2} = Z_{VIDE} \Omega * H_{A/m}^2$$
$$S_{W/m^2} = \frac{E_{V/m}^2}{Z_{VIDE} \Omega}$$

A partir d'une certaine distance, le champ magnétique émis par un fil linéaire parcouru par un courant alternatif, à une fréquence très éloignée de la résonance électrique du fil, voit sa divergence diminuer, et l'approximation de cette configuration au champ lointain dans l'air est acceptable.

L'excitation magnétique du champ électromagnétique, en A/m, est reliée au champ magnétique B, en Tesla, par :

$$B_{(T)} = \mu_0 * H_{(A/m)}$$

avec : $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7} \text{ kg.m.A}^{-2}.s^{-2} \text{ ou } T.m.A^{-1}$

En utilisant les formules de l'ICNIRP, un champ annoncé en V/m est convertible en teslas, ce qui donne la formule pratique en nanoteslas :

$$B_{(T)} = \frac{\mu_0 * V / m}{Z_{VIDE}}$$

$$B_{(nT)} = 3,333 * V / m$$