

**EVALUATION DE L'EXPOSITION DE LA
POPULATION AUX CHAMPS
ELECTROMAGNETIQUES EMIS DANS LES
LOGEMENTS PAR LES COMPTEURS
COMMUNICANTS D'ELECTRICITE « LINKY »**

RAPPORT FINAL

**CONVENTION RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT ANSES CSTB
N°2016-CRD-16**

N/Réf. DSC/ECE/2017-011/FG/BG

Auteurs	Approbation	Vérification
■■■■■■■	■■■■■■■	■■■■■■■
27 janvier 2017		

SOMMAIRE

0 - CONTEXTE ET PRINCIPE DE L'ETUDE	4
1 - CARACTERISTIQUES DES COMMUNICATIONS CPL LINKY	6
1.1 - L'ARCHITECTURE DU RESEAU DE TELE-RELEVÉ LINKY	6
1.2 - COMMUNICATIONS PAR COURANT PORTEUR EN LIGNE	6
1.3 - TECHNOLOGIES CPL	7
1.4 - EXPOSITION LIEE AUX COMMUNICATIONS CPL : MODE CONDUIT ET MODE RAYONNE....	8
2 - PRINCIPE DES MESURES REALISEES	9
3 - MESURES EN LABORATOIRE	11
3.1 - DESCRIPTION DES MESURES REALISEES	11
3.2 - NIVEAU DE BRUIT DANS LA CHAMBRE ANECHOÏQUE	13
3.3 - CARACTERISATION DES CHARGES EN AVAL DU COMPTEUR	14
3.4 - CARACTERISATION DES COMPTEURS LINKY PRETES PAR ENEDIS.....	15
3.5 - RESULTATS DES MESURES	16
3.5.1 - Influence de la distance au câble	20
3.5.2 - Influence de la distance entre le compteur et le point de mesure	21
4 - MESURES IN SITU	22
4.1 - METHODOLOGIE	22
4.2 - DETECTION DE TRAMES CPL LINKY <i>IN SITU</i>	22
4.2.1 - Détection de trames de tâche cyclique d'interrogation	22
4.2.2 - Détection d'une trame collecte.....	25
4.3 - MESURE AVANT ET APRES INSTALLATION D'UN COMPTEUR LINKY G1	27
4.3.1 - Description des mesures.....	27
4.3.2 - Les cinq campagnes de mesures	28
4.3.3 - Résultats	29
4.4 - MESURES A PROXIMITE D'UN CONCENTRATEUR	33
5 - CARACTERISATION DES SIGNAUX PRESENTS DANS LA BANDE DE FREQUENCES UTILISEES PAR LES COMMUNICATIONS CPL LINKY	37

5.1 - CARACTERISATION DES CHAMPS RAYONNES PAR D'AUTRES EQUIPEMENTS DANS LA BANDE LINKY	37
5.1.1 - Mesures de champ magnétique (mode rayonné)	37
5.1.2 - Mesures de courant électrique (mode conduit).....	39
5.2 - COMPARAISON DE SIGNAUX LINKY AVEC DES SIGNAUX D'AUTRES EQUIPEMENTS	41
6 - CONCLUSIONS.....	44

0 - CONTEXTE ET PRINCIPE DE L'ETUDE

Ce rapport présente les résultats de la campagne de mesures du CSTB pour la caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques émis par les compteurs communicants Linky. Cette étude a été réalisée à la demande de l'Anses, dans le cadre de la saisine, et du groupe de travail associé, portant sur l'évaluation de l'exposition liée aux compteurs communicants.

Plusieurs campagnes de mesures en laboratoire et *in situ* ont déjà été réalisées et publiées¹ pour caractériser l'exposition aux champs électromagnétiques des compteurs communicants Linky. L'objectif de la présente étude est de compléter les résultats déjà disponibles afin d'enrichir les connaissances sur la caractérisation de l'exposition liée aux compteurs Linky, en ne cherchant pas à reproduire ce qui a déjà été réalisé par l'Ineris et l'ANFR notamment.

Compte tenu des conclusions des rapports de mesures de l'Ineris et de l'ANFR, et compte tenu de la technologie des compteurs Linky et des communications par courant porteur en ligne, les axes retenus pour notre étude sont :

- La caractérisation non pas du rayonnement du compteur Linky mais du rayonnement des câbles électriques dans lesquels circulent les courants CPL émis par le compteur. Il s'agit, avec des mesures de courant électrique et de champ magnétique, de caractériser le rayonnement des câbles en amont du compteur (vers le poste de distribution et le concentrateur) et en aval du compteur (vers le réseau électrique du logement).
- L'identification et la caractérisation *in situ* des communications CPL Linky en fonctionnement normal : type de trames, fréquence de passage sur le réseau, etc. En fonctionnement normal, Enedis ignore que le CSTB effectue des mesures et n'intervient donc pas sur les installations concernées.
- L'étude d'impact en termes de niveaux d'exposition liée à l'installation d'un compteur Linky dans un logement.

¹ Ineris. 2016. "Champs électromagnétiques Produits Par Les Compteurs de Télérelève électrique Linky. Mesures Exploratoires." Rapport d'étude N° DRC-16-148901-04977A.

ANFR. 2016a. "Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky. Volet 1 : mesures en laboratoire."

ANFR. 2016b. "Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky. Volet 2 : mesures complémentaires en laboratoire."

ANFR. 2016c. "Rapport technique sur les niveaux de champs électromagnétiques créés par les compteurs Linky. Volet 3 : mesures sur le terrain."

Il y a eu moins de mesures *in situ* que prévues initialement, du fait de la difficulté de recrutement de personnes acceptant des mesures dans leur logement, avant et après installation d'un compteur Linky. Il n'a notamment pas été possible de réaliser des mesures *in situ* dans un logement équipé d'un compteur Linky G3.

1 - CARACTERISTIQUES DES COMMUNICATIONS CPL LINKY

1.1 - L'architecture du réseau de télé-relève Linky

Les compteurs Linky, qui remplacent en lieu et place les compteurs actuels, sont connectés, par le réseau électrique, à un poste de distribution d'électricité (transformateur haute tension/basse tension – HT/BT) *via* un concentrateur (cf. Figure 1). Ce concentrateur, installé dans le local du poste de distribution électrique, assure la communication avec les compteurs. L'ensemble des compteurs reliés à un même poste électrique / concentrateur est appelé une grappe.

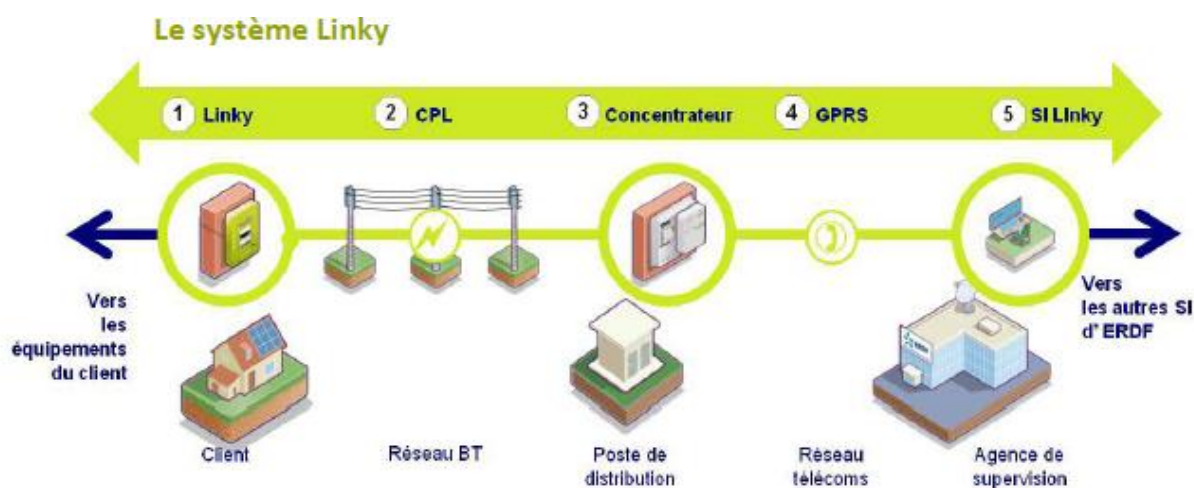


Figure 1 : illustration du fonctionnement du réseau de télé-relève d'Enedis – source : Enedis

1.2 - Communications par courant porteur en ligne

Le compteur Linky utilise le courant porteur en ligne ou CPL pour communiquer et échanger des données avec le concentrateur. La technologie CPL consiste à superposer au courant électrique alternatif 50 Hz circulant dans les câbles du réseau électrique un signal à plus haute fréquence pour propager les signaux d'information par conduction dans les câbles électriques.

Toutes les informations collectées dans une grappe sont ensuite envoyées par le concentrateur au moyen d'une liaison de téléphonie mobile en mode « données » (module GPRS installé dans le boîtier du concentrateur) à un système d'information centralisé.

Une communication bidirectionnelle entre le concentrateur et chaque compteur est utilisée pour plusieurs applications :

- Phase de mise en route de la liaison avec le concentrateur, à l'issue de l'installation du nouveau compteur ;

- Collecte quotidienne à distance de l'indice du compteur (télé-relève) : sur requête du concentrateur, chaque compteur envoie la valeur de l'index de consommation électrique de la journée écoulée ;
- Télé-opération : cette communication est établie, à la demande du client, pour des changements de tarifs, de puissance, à l'occasion de déménagement par exemple. Elle permet d'éviter le déplacement d'un technicien ;
- Alarmes : Le compteur Linky peut envoyer des signaux d'alarme (ouverture du capot du compteur, détection d'une surtension) ;
- Tâche cyclique d'interrogation : une communication courte (« ping » d'environ 140 ms) est établie périodiquement pour permettre un contrôle de l'état du réseau. La périodicité de cet échange avec le concentrateur dépend de la taille de la grappe de compteurs et de la configuration du réseau ;
- Mises à jour des logiciels embarqués dans le compteur ;
- Routage et répéteur : chaque compteur peut également servir de relais (routage) en répétant les informations qui sont destinées à un compteur plus éloigné du concentrateur, pour lequel le signal reçu directement serait trop faible pour être détecté correctement. Plusieurs compteurs peuvent temporairement être routeur / répéteur sur un chemin donné.

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.

À terme, il coexistera donc sur l'ensemble du réseau des grappes constituées d'un concentrateur et de compteurs de technologie G1 et des grappes constituées d'un concentrateur et de compteurs de technologie G3.

Le niveau d'émission des communications CPL qui circulent de façon bidirectionnelle entre concentrateurs et compteurs Linky s'exprime en niveau de tension par rapport à une impédance de ligne donnée. La norme NF EN 50065-1 fixe des gabarits de niveaux maximum de sortie en tension pour l'émission de signaux CPL. Ces niveaux dépendent de la valeur de la fréquence d'émission, du type de signal (bande étroite ou bande large) et sont donnés pour une impédance normalisée.

Les niveaux d'émission sont identiques pour l'ensemble des trames émises, et ne dépendent pas de la distance entre le concentrateur et les compteurs. En revanche, ces niveaux peuvent varier en fonction de l'impédance du réseau mais aussi du modèle de compteur, tout en restant conformes au gabarit autorisé par la norme.

1.4 - Exposition liée aux communications CPL : mode conduit et mode rayonné

L'électromagnétisme et l'électricité sont deux phénomènes intimement liés. Ils reposent chacun sur l'association de deux grandeurs physiques indissociables. En électromagnétisme, il s'agit du champ électrique et du champ magnétique. En électricité, il s'agit du courant et de la tension électriques. En régime alternatif, ces grandeurs physiques se propagent :

- dans des circuits électriques (« mode conduit ») sous la forme d'un courant et d'une tension électriques ;
- dans l'espace libre (« mode rayonné ») sous la forme d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui se propagent en interagissant avec le milieu de propagation et les objets de l'environnement (réflexion, diffraction, absorption, diffusion, pénétration dans les bâtiments).

Ces grandeurs (courant, tension et champs électrique et magnétique) sont liées entre elles par les lois physiques de l'électromagnétisme et de l'électricité (équations de Maxwell). Ainsi, la circulation d'un courant électrique dans un conducteur génère un champ magnétique rayonné autour de ce conducteur. Réciproquement, lorsqu'un objet conducteur est placé dans un champ magnétique variable, un courant induit est généré et circule dans le conducteur. De même, une tension électrique appliquée entre deux conducteurs séparés par une certaine distance conduit à la présence d'un champ électrique dans l'espace autour des conducteurs.

Ces liens entre le courant, la tension, les champs électriques et magnétiques expliquent la présence de champs électrique et magnétique à proximité d'un câble du réseau de distribution électrique. Ces rayonnements sont induits par la présence de courants et tensions électriques qui circulent dans les câbles. Cela est valable à la fréquence de 50 Hz autour des lignes de transport électrique (très haute tension, haute tension, moyenne tension – 20 kV à 400 kV) et dans l'habitat avec le réseau électrique basse tension (230 V).

Dans le cas d'utilisation de communication par CPL Linky, les courants et tensions dans la bande de fréquences 30 – 95 kHz vont *de facto* générer des champs électromagnétiques supplémentaires autour des câbles.

2 - PRINCIPE DES MESURES REALISEES

Le signal de communication Linky est un signal de tension est émis dans la bande de fréquences CPL Linky (30 kHz – 95 kHz), qui se superpose à la tension de 230 V à 50 Hz sur le réseau électrique.

Le courant électrique généré dans les câbles dans la bande de fréquences CPL Linky varie donc en fonction de l'impédance du réseau et de l'impédance des équipements électriques connectés sur le réseau (charge du réseau). Ce courant circulant dans les câbles va générer un champ magnétique rayonné autour des câbles, qui varie lui aussi en fonction des impédances de réseau.

Le champ électrique rayonné autour du compteur et des câbles est peu impacté par les communications CPL. Ce point a été montré notamment avec les campagnes de mesures réalisées par l'ANFR³.

Ainsi, nous nous intéressons uniquement dans cette campagne de mesures à la caractérisation des courants électriques et des champs magnétiques rayonnés.

➔ Mesures de courant électrique

Un dispositif de mesure de courant sur un câble électrique a été mis au point en laboratoire et testé avec différentes charges. Il est utilisé *in situ* pour la détection des trames CPL Linky.

➔ 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. ».

distance minimale de mesure entre l'antenne utilisée (sonde tri-axes) et le dispositif rayonnant, ou tout objet, est fixée à 20 cm, conformément à la norme IEC 61786-2⁴.

Pour les mesures de niveaux d'exposition *in situ* dans un logement, le point de mesure est situé à 1,5 mètre de hauteur. C'est la hauteur classiquement utilisée dans les protocoles de mesure d'exposition aux champs électromagnétiques.

Les niveaux de champ magnétique relevés sont des valeurs instantanées maximales, conformément au décret n°2002-775 sur les valeurs limites d'exposition aux ondes électromagnétiques⁵. La durée des communications CPL Linky ne modifie donc pas les valeurs mesurées. La valeur limite d'exposition en champ magnétique dans la bande de fréquences CPL Linky est de 6,25 μ T.

La bande de fréquences mesurée, dite « bande de fréquences CPL Linky » est située entre 30 kHz et 95 kHz. Elle intègre l'ensemble des 36 porteuses en technologie G3 et les deux fréquences porteuses en technologie G1. Dans le cas du CPL G1, des mesures spécifiques en bande étroite ont également été réalisées autour des deux fréquences porteuses (63,3 et 74 kHz). Le matériel de mesure utilisé est listé dans la Table 2-1.

Equipement	Modèle	Caractéristiques techniques
Analyseur de spectre	Narda SRM 3006	9 kHz – 6 GHz
Antenne de champ magnétique	Three Axis H-field 3581/02	9 kHz – 250 MHz 2,5 μ A/m à 560 mA/m
Oscilloscope numérique	Teledyne LeCroy 640Zi	4 GHz – 4 canaux
Sonde différentielle de tension	Teledyne LeCroy HVD3102	1 kV, 25 MHz
Sonde de courant	Teledyne LeCroy CP030A+	30 A rms CC - 50 A peak 50 MHz bandwidth - 1 mA/div
Réseau stabilisateur d'impédance de ligne (RSIL)	Rohde & Schwarz HM6050-2	10 kHz à 30 MHz, $Z_{\text{entrée}} = 50 \Omega // (50 \mu\text{H} + 5 \Omega)$
Analyseur de puissance	Chauvin Arnoud CA 8230	Puissances : W, VA, var, DF, THD, cos ϕ , tan ϕ Harmoniques: jusqu'au rang 50
Impédance-mètre et testeur d'installation électrique	FLUKE 1654B	Mesure de l'impédance de ligne/boucle

Table 2-1 : matériel utilisé pour les mesures

⁴ IEC 61786-2 : mesure de champs magnétiques continus et de champs magnétiques et électriques alternatifs dans la plage de fréquences de 1 Hz à 100 kHz dans leur rapport à l'exposition humaine – partie 2: norme de base pour les mesures

⁵ Décret n°2002-775 du 3 mai 2002 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

3 - MESURES EN LABORATOIRE

3.1 - Description des mesures réalisées

Les mesures sont réalisées dans la chambre anéchoïque de la plateforme Phéline située sur le site du CSTB de Saint Martin d'Hères (38400).

Enedis a prêté au CSTB deux compteurs Linky :

- Compteur G1 de marque Itron (T10624) : une commande logicielle permet de forcer le compteur à émettre de façon répétée des communications CPL ;
- Compteur G3 de marque SAGEMCOM : un interrupteur placé sur le compteur permet de forcer le compteur à émettre de façon répétée des communications CPL.

Ces deux compteurs Linky ne sont pas équipés d'émetteurs radio Linky (ERL).

La campagne de mesures a consisté à analyser le rayonnement des câbles de part et d'autre du compteur dans la bande de fréquences CPL Linky : le câble situé en amont, par lequel le compteur est relié au réseau électrique (prise électrique, réseau du CSTB, poste de distribution HTA/BT, etc.) et le câble situé en aval sur lequel peuvent être branchées différentes charges électriques.

Des mesures de courant dans les câbles et des mesures de champ magnétique rayonné autour de câbles sont réalisées conjointement. Le schéma du dispositif est illustré sur la Figure 3-1. Le compteur est relié en amont à l'alimentation électrique dans la chambre anéchoïque avec une rallonge de 3 mètres, *via* un boîtier permettant de positionner des sondes de courant et de tension (cf. Figure 3-2).

L'alimentation électrique de la chambre anéchoïque est une alimentation en 230 V monophasée, avec une impédance mesurée à 50 Hz d'environ 0,8 Ω . Le schéma de mise à la terre du réseau électrique de la chambre anéchoïque est de type T-T.

Le compteur est relié en aval à différentes charges électriques, avec une rallonge de 3 mètres *via* un boîtier permettant la mesure du courant et de la tension.

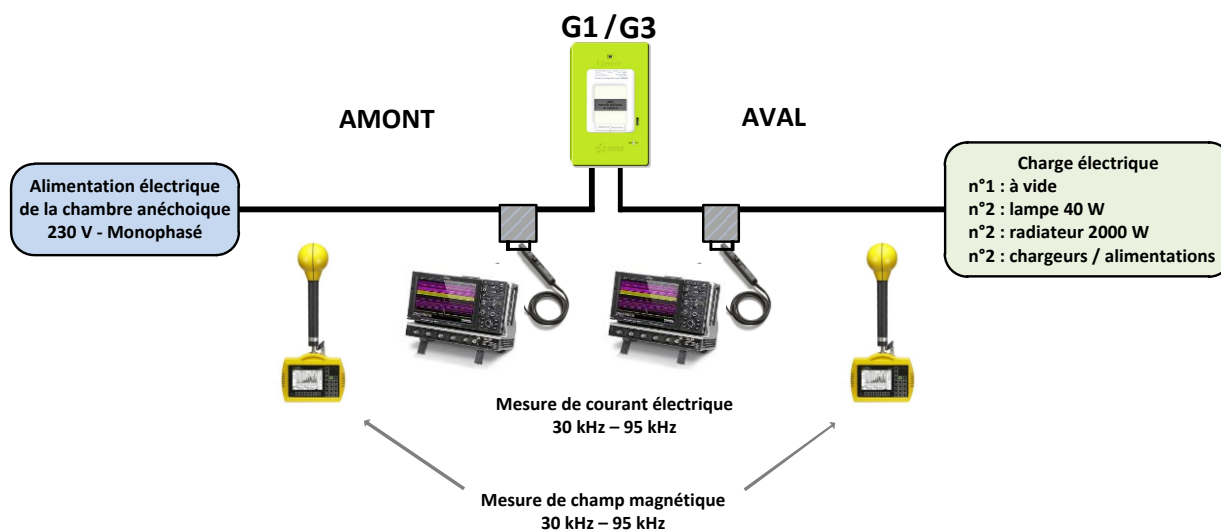


Figure 3-1 : schéma des mesures réalisées en laboratoire

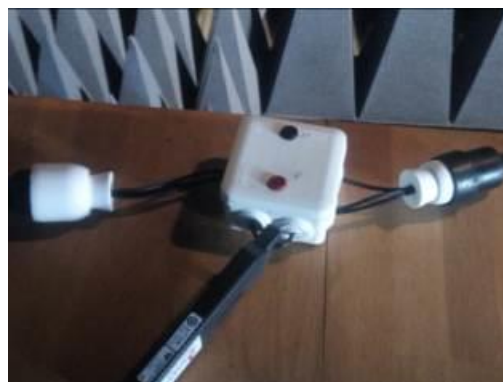


Figure 3-2 : compteur Linky et système de mesure du courant électrique



Figure 3-3 : mesures de champ magnétique et de courant électrique en amont et en aval d'un compteur Linky

Les mesures de courant sont réalisées avec une sonde de courant reliée à un oscilloscope numérique. Les principaux réglages de l'oscilloscope sont donnés dans la Table 3-1.

Bande passante 200 MHz
Echantillonnage à 500k éch/s
Trigger sur pente montante avec temporisation (hold off) de 150 ms
Analyse spectrale 30 kHz à 100 kHz avec fenêtre de pondération de Van Hann
Resolution bandwidth (RBW) : 50 Hz

Table 3-1 : réglage pour les mesures temporelle et spectrale du courant électrique

Les mesures de champ magnétique sont réalisées avec l'antenne tri axe et l'analyseur de spectre SRM 3006. La largeur de bande du filtre de résolution est de 50 Hz pour les mesures sur la bande de fréquences 30 kHz – 95 kHz. L'antenne est placée sur un trépied isolant à 20 cm du câble électrique (cf. Figure 3-3).

3.2 - Niveau de bruit dans la chambre anéchoïque

Les mesures réalisées dans la chambre anéchoïque permettent de s'affranchir au maximum des bruits électromagnétiques parasites et d'avoir dans la bande de fréquences CPL Linky un niveau de rayonnement ambiant faible et stable.

Le niveau moyen dans la bande CPL Linky est de $0,1 \times 10^{-5} \mu\text{T}$, pour un niveau maximum de $0,7 \times 10^{-5} \mu\text{T}$. La Figure 3-4 montre un exemple du spectre du champ magnétique mesuré dans la chambre anéchoïque.

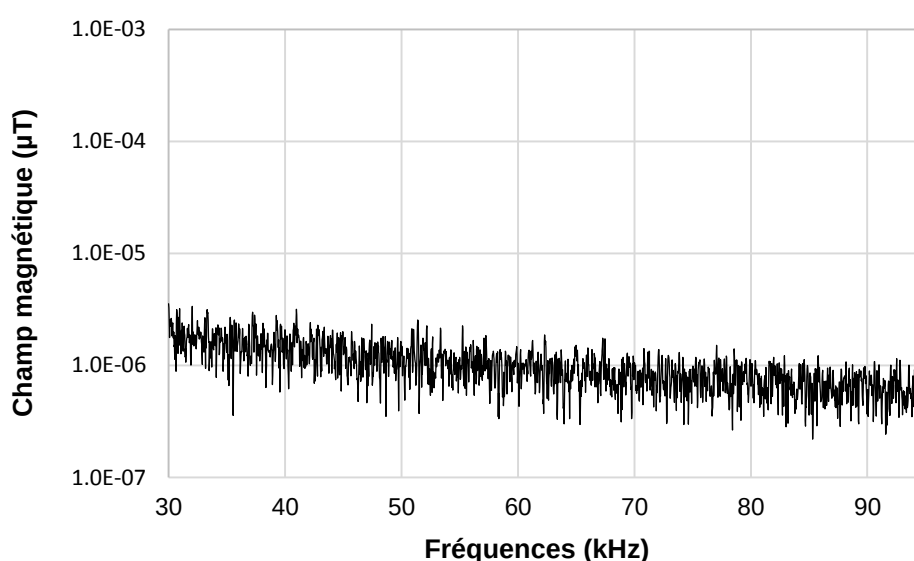


Figure 3-4: niveau de champ magnétique mesuré dans la chambre anéchoïque du CSTB

3.3 - Caractérisation des charges en aval du compteur

L'objectif est de mesurer les courants et champs générés par les trames de communications CPL, en amont et en aval du compteur Linky. Afin de quantifier la dépendance et la variabilité des valeurs de courant CPL en aval du compteur, quatre types de charges électriques ont été définis et étudiés (cf. Figure 3-5). Il s'agit d'être représentatif des situations que l'on peut rencontrer *in situ*, à savoir des charges plutôt résistives et des charges plutôt capacitives⁶. Les équipements électriques pouvant présenter des impédances inductives, comme les moteurs et les transformateurs ferromagnétiques, intègrent des composants de compensation (condensateurs par exemple) pour satisfaire aux normes de sécurité électrique. C'est pourquoi nous n'avons pas inclus de charges inductives dans cette étude.

- | | |
|------------|--|
| Charge n°1 | Pas de charge électrique ; la rallonge électrique de 3 mètres est branchée d'un côté au compteur Linky et laissée libre de l'autre côté. |
| Charge n°2 | Lampe à incandescence de 40 W. |
| Charge n°3 | Radiateur électrique à inertie de 2 kW ; nous nous sommes assurés dans l'ensemble des essais réalisés que le radiateur fonctionnait toujours à pleine puissance. |
| Charge n°4 | Quatre chargeurs / alimentations d'ordinateurs portables sont branchés sur une multiprise électrique (branchement en parallèle). Les chargeurs ne sont pas eux-mêmes branchés sur un ordinateur. Cette configuration permet d'obtenir une charge très capacitive (étage d'entrée des alimentations à découpage). |



Figure 3-5: les charges n°2, 3 et 4 utilisées en laboratoire

⁶ De façon simplifiée, les équipements électriques que l'on branche sur le réseau alternatif se comportent comme des charges associant des résistances, des condensateurs et des inductances. Par exemple un radiateur ou une lampe à incandescence sont des charges plutôt résistives. Un moteur est une charge plutôt inductive. Les alimentations électroniques sont plutôt des charges capacitives, en raison de la présence de condensateurs dans l'étage d'entrée des circuits électroniques.

Charge électrique en aval du compteur		Mesures de puissance électrique					
		Courant	Puissance active	Puissance apparente	Puissance réactive	Impédance à 50 Hz (Ohms)	Angle de phase entre courant et tension
		A (rms)	W	VA	VAR		
n°2	Lampe 40 W	0,2	43,3	43,3	0,8	1336 + jx25	1,0°
n°3	Radiateur 2000W	8,5	1983,2	1983,2	11,9	27 + jx0,2	-0,3°
n°4	Chargeurs / alimentations	0,1	1,4	25,4	-25,4	2306 - jx2303	86,9°

Table 3-2 : caractérisation des charges électriques utilisées

La Table 3-2 donne les résultats de mesure de puissance électrique des charges utilisées. Les charges n°2 et 3 sont purement résistives. La charge n°4 est très capacitive. L'ensemble de ces quatre charges permet de caractériser la variabilité des configurations rencontrées dans l'installation électrique standard d'un logement.

3.4 - Caractérisation des compteurs Linky prêtés par Enedis

Des mesures des niveaux de tension électrique émis par les compteurs, pour les différentes charges électriques ont été réalisées. Le compteur est branché en amont sur un réseau stabilisateur d'impédance de ligne et la mesure est réalisée selon les spécifications de la norme NF EN 50065-1.



Figure 3-6: caractérisation des niveaux de sortie en tension des compteurs Linky prêtés par Enedis (norme EN 50065-1)



Figure 3-7: mesure de tension en sortie du compteur G1 : visualisation d'une trame (à gauche) et du spectre dans la bande de fréquences CPL Linky (à droite)

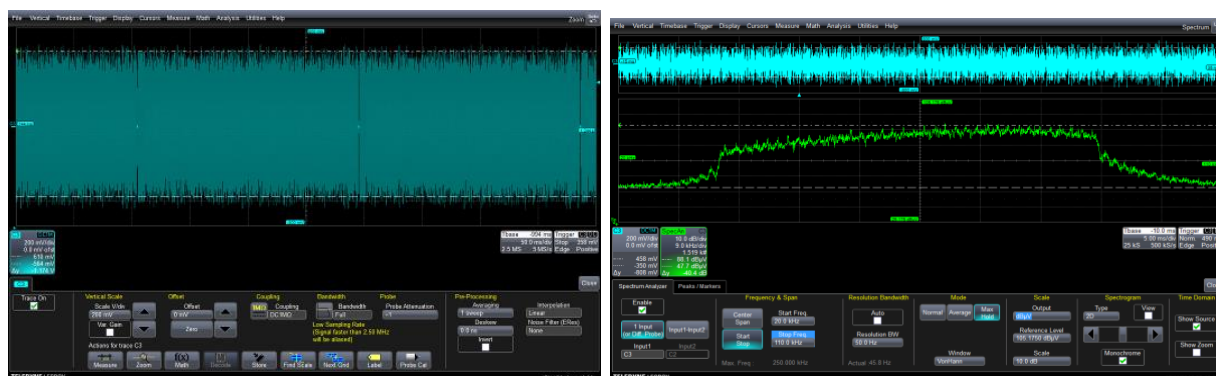


Figure 3-8: mesure de tension en sortie du compteur G3 : visualisation des trames (à gauche) et du spectre dans la bande de fréquences CPL Linky (à droite)

Compteur	Emission CPL	Charge électrique en aval du compteur	Tension crête - crête	Tension dBμV
G1	activée	Sans charge	926 mV	110.3 dBμV
		Lampe 40W	944 mV	110.5 dBμV
		Chargeurs / alimentations	444 mV	103.9 dBμV
G3	activée	Sans charge	1228 mV	112.8 dBμV
		Lampe 40W	1180 mV	112.4 dBμV
		Chargeurs / alimentations	660 mV	107.4 dBμV

Table 3-3 : tension émise par les compteurs G1 et G3 prêtés par Enedis.

Les Figure 3-7 et Figure 3-8 illustrent les niveaux temporels de tension et le spectre dans la bande de fréquences 30 kHz – 95 kHz, pour le compteur G1 et pour le compteur G3.

En mode forcé, les compteurs émettent des trames de 140 ms de façon quasi continue pour le G3 et répétée à intervalle régulier pour le G1. Les spectres permettent de visualiser la modulation FSK sur deux fréquences pour le G1, et les 36 sous porteuses OFDM pour le G3.

La Table 3-3 donne les résultats des niveaux de tension mesurés. Ces niveaux respectent les niveaux d'émission maximum donnés par la norme EN 50065-1 (entre 134 et 120 dBμV en fonction de la valeur de fréquence).

Ces mesures illustrent aussi la variation de la tension délivrée pour les communications CPL, qui dépend de l'impédance en aval du compteur. Le niveau de tension est identique avec les deux charges résistives ; il est inférieur de 5 à 7 dBμV avec la charge capacitive. Le compteur adapte donc son niveau d'émission CPL en fonction de l'impédance qu'il détecte dans la bande de fréquence CPL. Dans le cas de faibles impédances, comme les charges très capacitatives, le niveau d'émission sera plus faible.

3.5 - Résultats des mesures

Les Figure 3-9 à Figure 3-11 montrent quelques résultats des formes temporelle et spectrale du courant électrique dans différentes configurations mesurées : en amont, en aval, avec différentes charges électriques. Les Table 3-4 à Table 3-7 donnent les résultats

des niveaux maximum de champ magnétique et de courant électrique mesurés dans l'ensemble des configurations.



Figure 3-9: mesure de trames CPL Linky en courant – en aval du compteur, avec la charge n°4 « chargeurs / alimentations » - compteur G1 (à gauche) et compteur G3 (à droite)

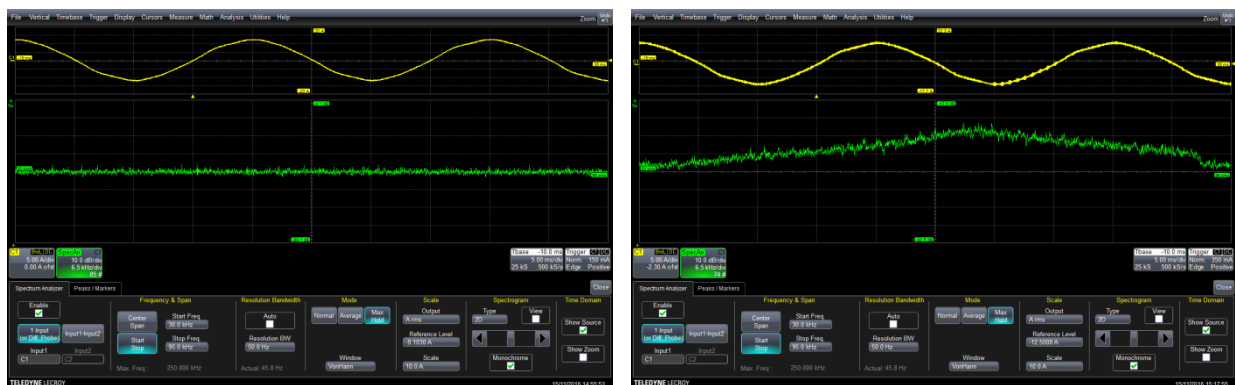


Figure 3-10: mesure de courant (temporel et spectre dans la bande CPL Linky) – mesures en amont du compteur G3, avec charge n°3 « radiateur 2000W » : sans communications CPL (à gauche) et avec communications CPL (à droite)

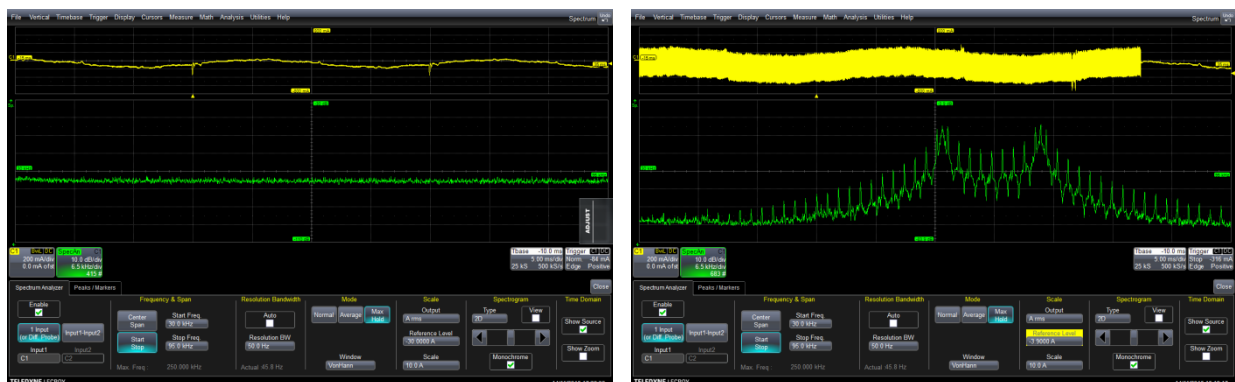


Figure 3-11: mesure de courant (temporel et spectre dans la bande CPL Linky) – mesures en aval du compteur G1, avec charge n°4 « chargeurs / alimentations » : sans communications CPL (à gauche) et avec communications CPL (à droite)

Alimentation électrique	Amont du compteur		G1	Aval du compteur		Charge électrique
	Sans communication CPL	Avec communication CPL		Sans communication CPL	Avec communication CPL	
	$0,5 \times 10^{-5} \mu T$	$19,1 \times 10^{-5} \mu T$		$0,7 \times 10^{-5} \mu T$	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	Sans charge
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$18,8 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	Lampe 40 Watts
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$18,6 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$2,6 \times 10^{-5} \mu T$	Radiateur 2000 Watts
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$7,8 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$32,7 \times 10^{-5} \mu T$	Chargeurs / alimentations

Table 3-4 : mesures de champ magnétique maximum en amont et en aval du compteur G1, pour les différentes charges électriques

Alimentation électrique	Amont du compteur		G3	Aval du compteur		Charge électrique
	Sans communication CPL	Avec communication CPL		Sans communication CPL	Avec communication CPL	
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$5,4 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	Sans charge
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$5,3 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	Lampe 40 Watts
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$5,2 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$0,9 \times 10^{-5} \mu T$	Radiateur 2000 Watts
	$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$2,9 \times 10^{-5} \mu T$		$0,6 \times 10^{-5} \mu T$	$11,9 \times 10^{-5} \mu T$	Chargeurs / alimentations

Table 3-5 : mesures de champ magnétique maximum en amont et en aval du compteur G3, pour les différentes charges électriques

Alimentation électrique	Amont du compteur	G1	Aval du compteur	Charge électrique
	Avec communication CPL		Avec communication CPL	
	103,8 mA		2,6 mA	Sans charge
	201,2 mA		9,6 mA	Radiateur 2000 Watts
	82,7 mA		127,8 mA	Chargeurs / alimentations

Table 3-6 : mesures de courant électrique maximum en amont et en aval du compteur G1

Alimentation électrique	Amont du compteur	G3	Aval du compteur	Charge électrique
	Avec communication CPL		Avec communication CPL	
	58,4 mA		0,2 mA	Sans charge
	57,4 mA		2,9 mA	Radiateur 2000 Watts
	28,7 mA		38,9 mA	Chargeurs / alimentations

Table 3-7 : mesures de courant électrique maximum en amont et en aval du compteur G3

En l'absence de communications CPL, les niveaux de champ magnétique dans la bande de fréquences CPL Linky sont identiques dans toutes les configurations : compteurs G1 et G3, mesures en amont et en aval du compteur, charges électriques en aval. Cela correspond au niveau maximum de bruit de fond, soit environ $0,6 \times 10^{-5} \mu T$.

En activant les communications Linky sur les compteurs G1 et G3, un courant électrique et un champ magnétique rayonné sont mesurés dans la bande de fréquences CPL Linky, en amont et en aval pour les différentes charges électriques.

- En amont du compteur, la valeur du courant électrique et le niveau de champ magnétique rayonné augmentent plus avec le compteur G1 qu'avec le compteur G3. Cela traduit la différence entre les deux technologies, la modulation OFDM en G3 étant à large bande par rapport à la modulation en bande étroite du G1.
- En amont du compteur, les valeurs de courant et niveaux de champ augmentent moins avec la charge n°4 capacitive. Nous avons en effet déterminé précédemment que le type de charge située en aval agit sur le niveau de tension d'émission et donc sur le courant signal CPL émis en amont vers le concentrateur.
- En aval du compteur, il existe aussi un courant CPL et un champ magnétique rayonné, qui dépendent plus fortement du type de charge électrique. Plus l'impédance de la charge est faible (cas des appareils de forte puissance), plus le niveau de champ et de courant est élevé. Dans le cas des charges résistives, les niveaux de courant en aval du compteur restent beaucoup plus faibles que les niveaux en amont du compteur. En revanche pour une charge capacitive, les niveaux de courant et de champ magnétique en aval sont plus élevés qu'en amont du compteur. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'impédance de la charge capacitive n°4 dans la bande de fréquences CPL Linky doit être plus faible que l'impédance de la plus faible charge résistive utilisée (charge n°3 : radiateur de forte puissance).

Ces résultats de mesures en laboratoire illustrent l'absence de découplage entre l'amont et l'aval du compteur. Ce réseau est constitué conjointement de :

- la partie amont vers le concentrateur, le réseau de distribution, les autres compteurs Linky de la grappe et l'ensemble des autres équipements électriques connectés par les usagers. Elle est caractérisée dans la bande de fréquences CPL Linky par une valeur d'impédance aux fréquences CPL qui varie dans le temps en fonction de l'évolution de l'ensemble du réseau de distribution relié au concentrateur.
- la partie aval, vers le logement, caractérisée par une valeur d'impédance qui varie aussi en fonction des équipements électriques connectés dans le logement.

Les courants CPL émis par un compteur Linky se propagent en amont et en aval du compteur avec des niveaux qui dépendent des impédances électriques distribuées le long de leur parcours (théorie des lignes de transmission). De façon simplifiée, l'intensité du courant CPL est donnée par la loi d'Ohm $\mathbf{i} = \mathbf{u} / \mathbf{Z}$, où $\mathbf{i}$, $\mathbf{u}$ et $\mathbf{Z}$ sont respectivement les valeurs complexes du courant, de la tension d'émission et de l'impédance. Les mesures d'émission effectuées dans la partie précédente ont montré que la tension d'émission $\mathbf{u}$ est ajustée par le compteur selon l'impédance de réseau qu'il détecte. Celle-ci correspond

donc à la mise en parallèle des parties amont et aval au compteur. La Figure 3-12 montre un schéma simplifié des relations entre les impédances de réseau et de charges, le niveau d'émission ainsi que les courants circulant en amont et en aval.

Compte tenu de la complexité et variabilité électrique du réseau de distribution, et de l'absence de découplage amont / aval au niveau du compteur, il est difficile d'extrapoler les résultats de mesures en laboratoire, au travers de modélisation ou de lois de comportement théoriques par exemple. Toutes les grandeurs électriques – tension CPL délivrée par le compteur, courant CPL circulant dans un câble, champ magnétique rayonné – sont corrélées et dépendantes des variations des valeurs d'impédance amont et aval.

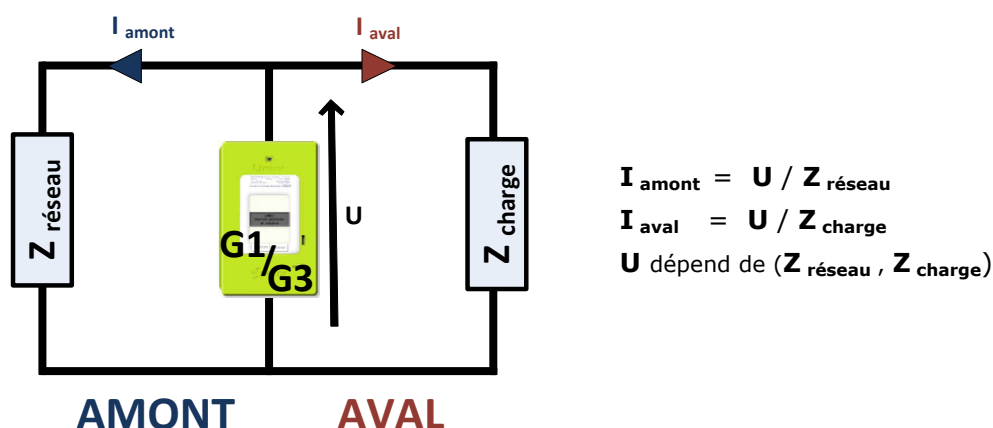


Figure 3-12: schéma électrique amont / aval du compteur

La charge n°4 « chargeurs / alimentations », très capacitive, permet d'avoir un niveau de courant CPL suffisamment élevé. Il est ainsi possible de détecter et visualiser facilement les trames de communications qui circulent en aval du compteur. Cette charge sera utilisée pour les mesures *in situ* afin de valider la présence ou non de trames de communications CPL et les cas échéant d'estimer la fréquence des trames de communications.

3.5.1 - Influence de la distance au câble

Le niveau de champ magnétique rayonné autour d'un câble décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du câble. Cette décroissance du niveau de champ est illustrée sur la Figure 3-13 à partir de mesures réalisées à différentes distances du câble.

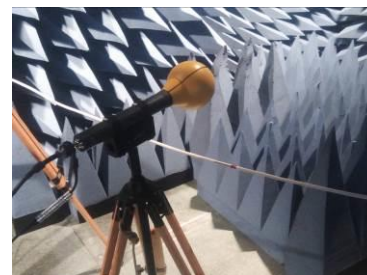
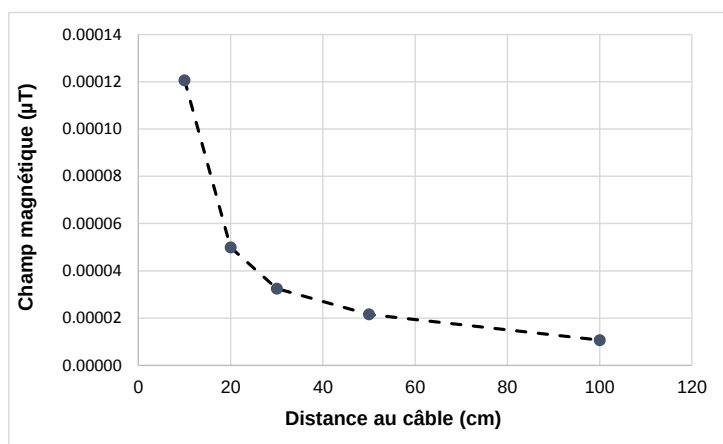


Figure 3-13: décroissance du niveau maximum de champ magnétique en s'éloignant du câble
(mesures en aval du compteur avec communications CPL G3 et charge n°4 « chargeurs /

3.5.2 - Influence de la distance entre le compteur et le point de mesure

L'influence de la distance entre le compteur et le point de mesure a été mesurée en amont du compteur, avec des rallonges électriques standard de différentes longueurs. Compte tenu des atténuations au cours de la propagation dans un câble, le champ magnétique rayonné décroît quand la longueur de câble augmente (cf. Figure 3-14).

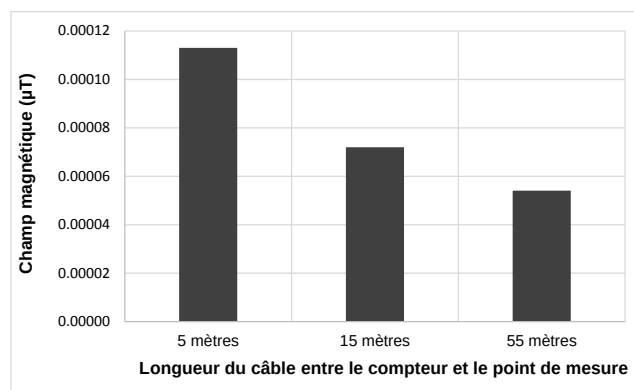


Figure 3-14: influence de la longueur du câble entre le compteur et le point de mesure

4 - MESURES *IN SITU*

4.1 - Méthodologie

Des mesures *in situ* ont été réalisées afin de visualiser le trafic des communications CPL Linky, les niveaux d'exposition générés et leur variabilité. Sur chaque site sont réalisées conjointement :

- Des mesures de courant électrique dans la bande CPL Linky

Le courant est mesuré avec l'oscilloscope numérique et la sonde de courant sur une rallonge électrique raccordée à la charge n°4 (« chargeurs / alimentations ») et branchée sur une prise électrique à proximité du compteur. Ces mesures permettent de visualiser un enregistrement temporel des trames circulant sur le réseau et une analyse spectrale du courant électrique dans la bande CPL Linky.

- Des mesures de champ magnétique

Ces mesures sont réalisées dans la bande de fréquences CPL Linky, d'une part en parallèle des mesures de courant, à 20 cm du câble de la rallonge électrique et d'autre part pour les mesures d'exposition environnementale. Dans ce cas, l'antenne est placée à une hauteur de 1,5 mètre et à une distance d'au moins 20 cm de tout objet. Un enregistrement temporel d'au minimum 30 minutes est effectué pour permettre de visualiser la présence et le nombre de trames CPL Linky, et de connaître le niveau de champ maximum.

4.2 - Détection de trames CPL Linky *in situ*

4.2.1 - Détection de trames de tâche cyclique d'interrogation

Une première mesure a eu lieu en milieu d'après-midi (17/11/2016, 15h – 17h30), dans une maison située à Fontaine (38600), dans le garage en rez-de-chaussée, à proximité du tableau électrique. Un compteur Linky G1 de marque Itron (T10624) y a été installé par Enedis en juillet 2016. L'objectif de ces mesures était de visualiser une trame de type « Ping » (tâche cyclique d'interrogation), en fonctionnement normal, c'est à dire sans avoir demandé au préalable à Enedis de forcer le concentrateur à envoyer des requêtes.

Les mesures ont consisté en :

- Mesure de courant électrique dans la bande CPL Linky ; la rallonge électrique avec la charge n°4 est branchée sur une prise dans le garage, située à 2 mètres du tableau électrique - Figure 4-1. Un enregistrement sur 30 minutes avec déclenchement de l'oscilloscope (trigger réglé sur front montant) permet de visualiser les trames CPL Linky circulant sur le réseau en aval du compteur.

- Mesure de champ magnétique : la sonde est placée à 20 cm au-dessus du milieu de la rallonge électrique. Les spectres de champ magnétique sont enregistrés pendant 30 minutes.

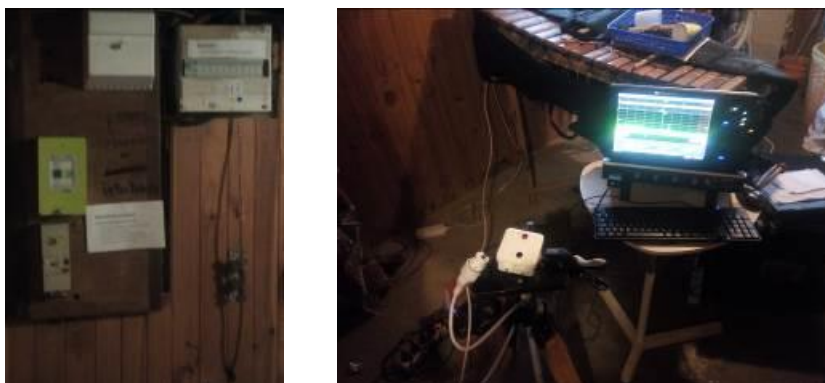


Figure 4-1: le tableau électrique avec un compteur Linky G1 et la mesure de courant CPL

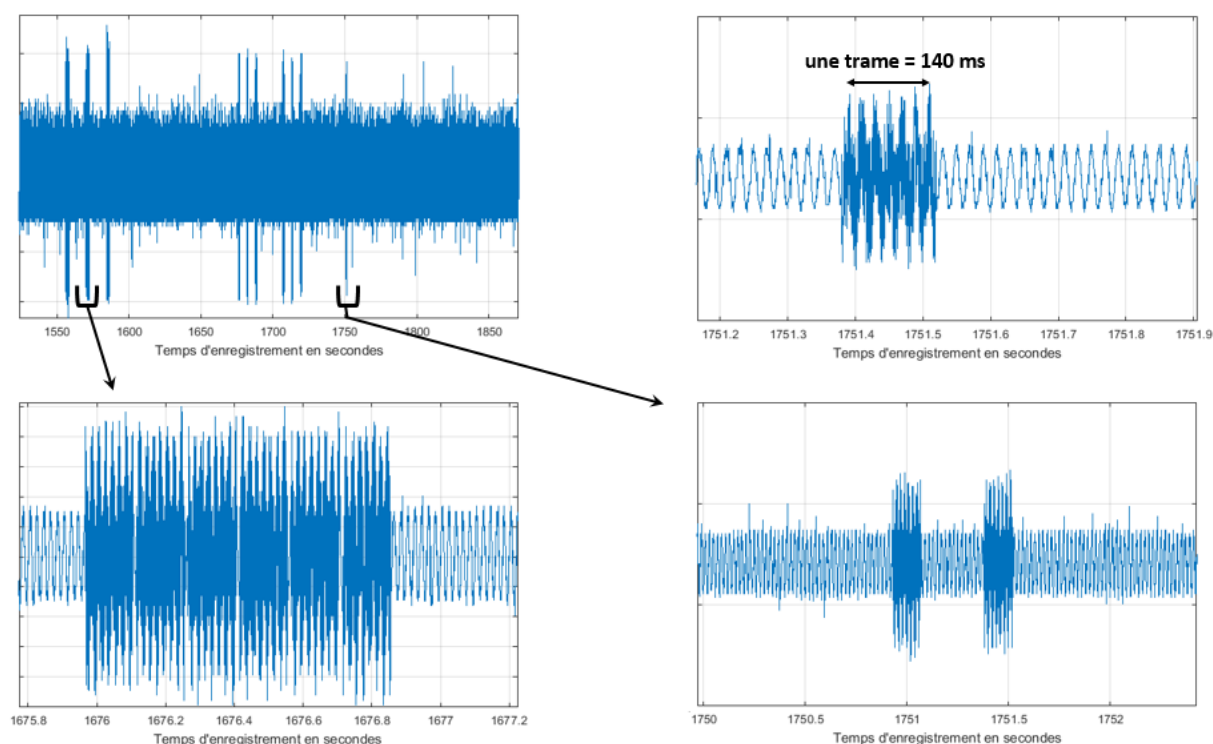


Figure 4-2: enregistrements temporels du courant dans la bande CPL Linky – visualisation des trames de communications CPL G1

De nombreuses trames CPL Linky circulent sur le réseau électrique et ont été enregistrées conjointement en mode conduit (courant électrique) et en mode rayonné (champ magnétique). La Figure 4-2 montre un extrait de l'enregistrement temporel du courant électrique dans la bande CPL Linky, sur lequel on peut voir des trames circulant

irrégulièrement, soit isolée, soit par paquet de plusieurs trames (entre 2 et 9 dans l'enregistrement effectué). Chaque trame a une durée de 140 millisecondes. Il y a environ 4 à 6 trames de 140 millisecondes par minute. Cette estimation moyenne est calculée à partir de l'enregistrement effectué sur 30 minutes.

La Figure 4-3 montre des exemples de spectres de trames CPL Linky G1, extraits de l'enregistrement du niveau de champ magnétique rayonné.

Le nombre de trames circulant sur le réseau, et le fait que ces trames mesurées ont des niveaux très différents, semblent indiquer que l'on mesure indifféremment des trames émises par le compteur Linky situé dans le garage, mais aussi les trames émises par les autres compteurs Linky du quartier (grappe) ainsi que les trames de requêtes émises par le concentrateur.

Il n'est pas possible dans ces mesures *in situ* de différencier les types de trames : tâche cyclique d'interrogation, trames issus de compteur répéteur, trames de télé opération ou d'alarme.

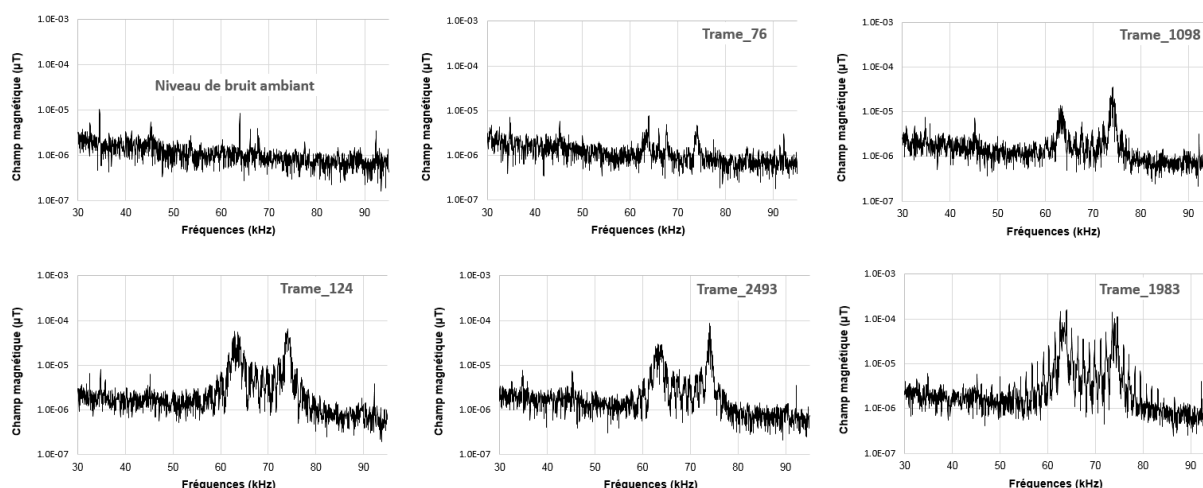


Figure 4-3: exemples de spectres trames mesurées

Le niveau maximum de champ magnétique mesuré avec communication CPL Linky est environ dix fois supérieur au niveau maximum mesuré sans communication CPL (niveau de bruit ambiant au point de mesure). Ce niveau reste très largement en dessous de la valeur limite d'exposition (cf. Table 4-1).

Point de mesure	Niveau de champ magnétique Bande CPL Linky : 30 - 95 kHz	
	Niveau maximum	Valeur Limite d'exposition
En absence de trame CPL Linky	$2,3 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
Avec passage de trames CPL Linky	$20,1 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT

Table 4-1 : niveau maximum de champ magnétique mesuré sur un enregistrement de 30 minutes

4.2.2 - Détection d'une trame collecte

Une seconde mesure a eu lieu de nuit (15/12/2016, 18h30 – 8h30), sur le site précédent, afin d'essayer de détecter la trame de collecte de l'index de consommation qui est envoyée chaque nuit par le compteur sur requête du concentrateur. Enedis n'a pas été informé de la réalisation de cette mesure.

L'enregistrement complet du courant électrique dans la bande CPL Linky est donné sur la Figure 4-4. Une analyse plus précise des communications CPL entre minuit et 6h du matin est donnée sur la Figure 4-5.

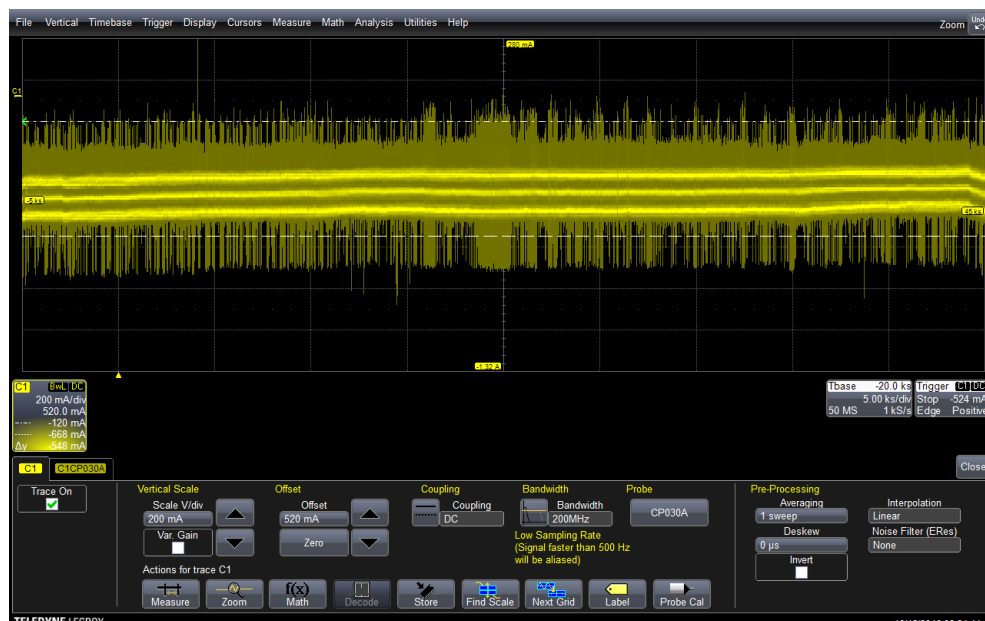


Figure 4-4: enregistrement temporel du courant dans la bande CPL Linky entre 18h30 et 8h30

Compte tenu du trafic de communications pendant la durée de l'enregistrement, il est difficile d'isoler la trame de collecte d'index du compteur situé dans la maison. Il n'y a pas d'augmentation du niveau d'émission (valeur du courant maximum émis) des trames de communications CPL qui circulent pendant la nuit. En revanche, on observe pendant certaines périodes une augmentation significative du nombre et de la durée des trames

circulant sur le réseau électrique de la maison. Sur la Figure 4-5 on observe par exemple une trame d'une durée d'environ 3,2 secondes

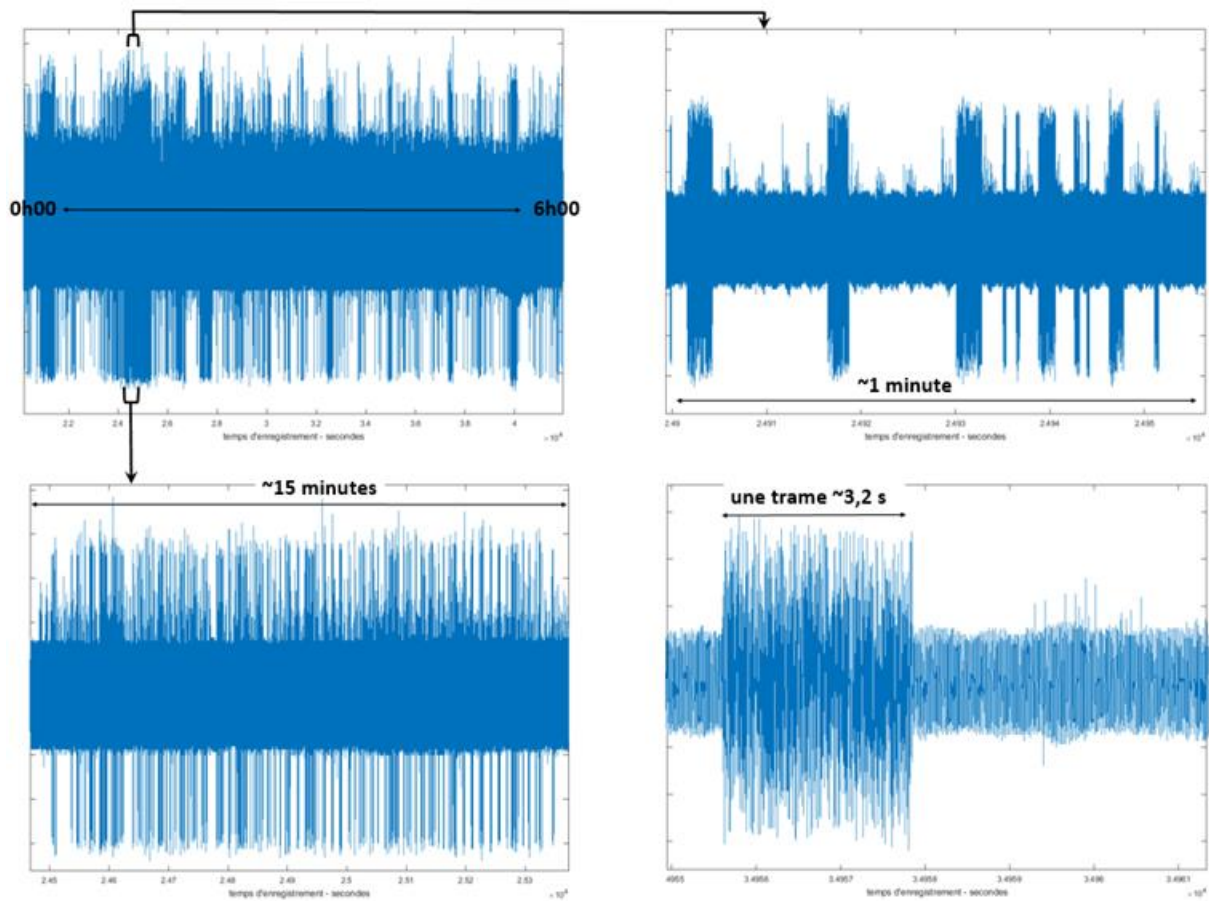


Figure 4-5: enregistrements temporels du courant dans la bande CPL Linky entre minuit et 6 h

4.3 - Mesure avant et après installation d'un compteur Linky G1

4.3.1 - Description des mesures

Des mesures *in situ* ont été réalisées dans un appartement situé à Saint Martin d'Hères (38400) afin de comparer les niveaux d'exposition avant et après installation d'un compteur Linky G1. Certaines ont été réalisées en demandant à Enedis d'augmenter les requêtes de trames CPL sur le réseau, et d'autres ont été réalisées sans qu'Enedis en soit informé. Les mesures ont consisté en :

- **Des mesures de courant électrique dans la bande de fréquences CPL Linky**

Le courant est mesuré avec l'oscilloscope numérique et la sonde de courant sur une rallonge électrique raccordée à la charge n°4 (« chargeurs / alimentations ») et branchée sur une prise électrique située dans l'entrée à proximité du tableau électrique dans l'entrée de l'appartement. Ces mesures permettent de visualiser la présence ou non de trames de communications CPL Linky et de réaliser un enregistrement temporel de ces trames.

En parallèle, des mesures de champ magnétique sont réalisées à 20 cm de la rallonge électrique. – cf. Figure 4-6.



Figure 4-6: le tableau électrique avec l'ancien compteur (à gauche) - mesures de courant électrique CPL Linky et de champ magnétique rayonné dans l'entrée devant le tableau électrique (à droite)

- **Des mesures d'exposition en champ magnétique dans la bande de fréquences CPL Linky**

Ces mesures sont réalisées à une hauteur de 1,5 mètre au centre des pièces de l'appartement. Un enregistrement des spectres de champ magnétique dans la bande de fréquences CPL Linky est réalisé pendant 15 minutes afin de pouvoir estimer le niveau maximum de champ et de valider la présence de trames de communication CPL.

Les points de mesure sont – cf. Figure 4-7 :

Point de mesure A : dans l'entrée, devant le tableau électrique (à 55 cm du tableau)

Point de mesure B : dans la salle de jeux

Point de mesure C : dans le salon

Point de mesure D : dans la chambre d'enfants, au niveau supérieur (duplex)



Figure 4-7: les points de mesure in situ : A, B, C et D

4.3.2 - Les cinq campagnes de mesures

Afin de caractériser l'impact des communications CPL Linky mais aussi la variabilité sur les résultats, les mesures précédentes ont été réalisées à cinq reprises, entre le 9 novembre et le 16 décembre 2016 :

- **1^{ère} campagne de mesures** avec l'ancien compteur électrique

Avant installation du compteur Linky ; Enedis n'est pas informé de cette campagne de mesures.

- **2^{ème} campagne de mesures** avec l'ancien compteur électrique

Avant installation du compteur Linky ; Enedis n'est pas informé de cette campagne de mesures. Pendant ces mesures, le concentrateur Linky de la grappe émet des communications CPL. Cette présence de trames CPL sur le réseau n'était pas du tout attendue. L'appartement a certainement été l'un des derniers à bénéficier du changement de compteur. Les communications CPL ont certainement été mises en route avant que l'ensemble des compteurs de la grappe soient opérationnels.

- **3^{ème} campagne de mesures** après installation du compteur Linky G1 de marque Landis. Le CSTB a demandé à Enedis d'augmenter les requêtes CPL pendant le temps de la mesure.

- **4^{ème} campagne de mesures** identiques à la 3^{ème} campagne de mesures, mais effectuée trois jours plus tard. Le CSTB a demandé à Enedis d'augmenter les requêtes CPL pendant le temps de la mesure.

▪ **5^{ème} campagne de mesures** après installation du compteur Linky G1.

Enedis n'est pas informé de la réalisation de cette dernière campagne de mesure.

Toutes ces mesures ont été réalisées avec une configuration identique du réseau électrique de l'appartement, c'est-à-dire avec les mêmes équipements électriques éteints ou en fonctionnement (luminaires, ordinateurs, gros électroménager, etc.).

4.3.3 - Résultats

Pour chaque emplacement de mesure, le niveau de bruit dans la bande CPL Linky est identique dans les cinq campagnes de mesures, excepté pour le point de mesure A.

Pour le point de mesure A, dans l'entrée à proximité du tableau électrique, le niveau de bruit comporte plusieurs signaux variables à bande étroite (raies spectrales) entre 30 kHz et 52 kHz environ, d'un niveau maximum de champ magnétique situé entre 2,5 et 5×10^{-5} μ T (cf. Figure 4-8).

Ces signaux semblent provenir de l'électronique présente dans le tableau électrique puisqu'ils s'affaiblissent en s'éloignant du tableau électrique. Ces signaux n'ont pas été pris en compte dans les résultats donnés de niveau de champ maximum en présence de trames CPL Linky.

Lors de la 2^{ème} campagne de mesures, l'ancien compteur électrique est toujours installé dans le tableau électrique et, malgré l'absence de compteur Linky dans l'appartement, nous mesurons des trames de communications CPL Linky, conjointement en courant électrique et en champ magnétique, dans l'ensemble de l'appartement. Ces trames doivent provenir du concentrateur et des compteurs Linky voisins, déjà installés dans le quartier.

Ainsi, à partir de la 2^{ème} campagne de mesures, des trames de communications CPL Linky sont détectées et enregistrées ; elles circulent sur l'ensemble du réseau électrique de l'appartement. Ces trames sont aussi mesurées en champ magnétique dans les toutes les pièces de l'appartement.

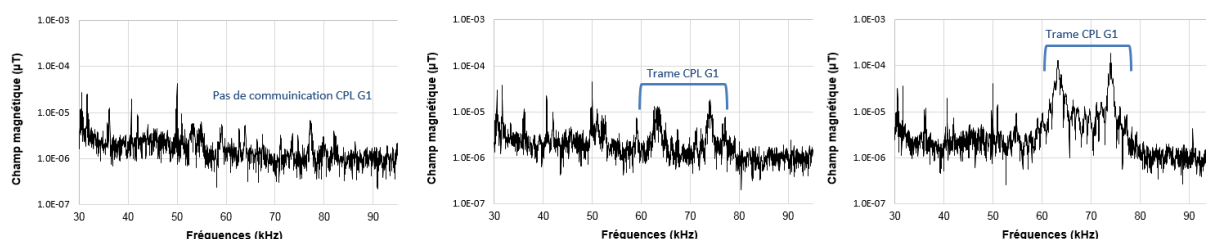


Figure 4-8: extrait de l'enregistrement temporel des niveaux de champ magnétique dans la bande CPL Linky – Point de mesure A

Des exemples de spectres en champ magnétique de trames CPL sont illustrés pour deux points de mesure sur les Figure 4-8 et Figure 4-9. Des exemples d'enregistrements temporels en courant CPL sont donnés dans les Figure 4-10 et Figure 4-11. On observe

des trames de niveaux variables, qui circulent soit isolées, soit regroupées en paquets de plusieurs trames (entre 2 et 9 trames dans nos enregistrements).

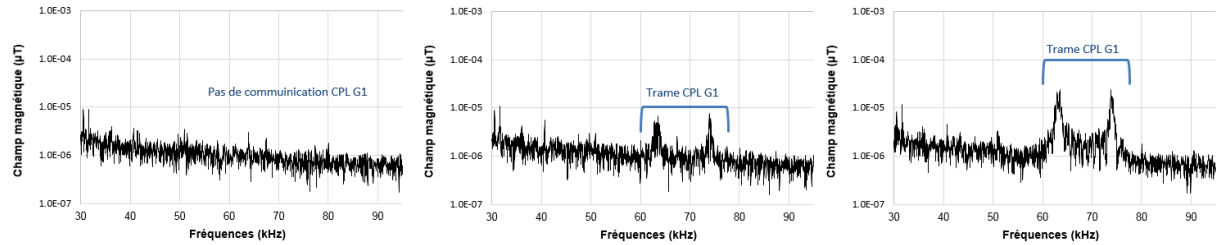


Figure 4-9: extrait de l'enregistrement temporel des niveaux de champ magnétique dans la bande CPL Linky – Point de mesure B

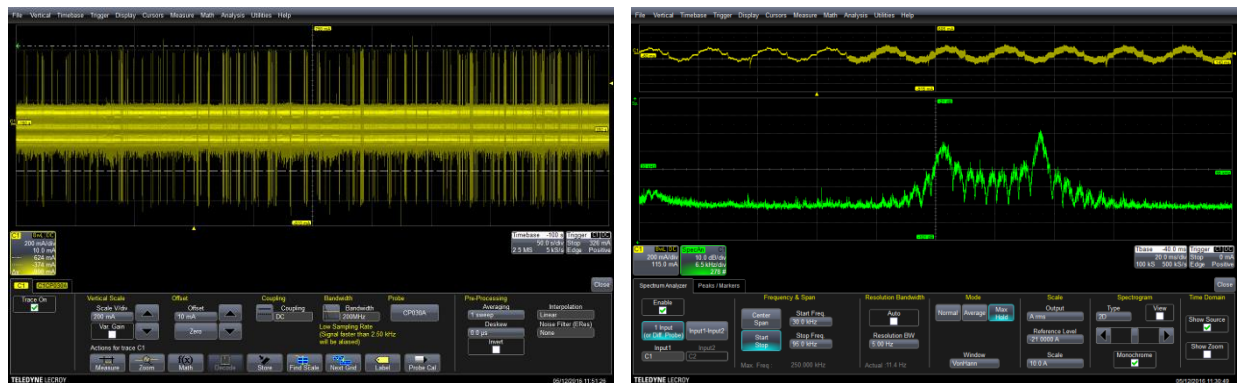


Figure 4-10: enregistrement temporel et analyse spectrale du courant électrique CPL Linky

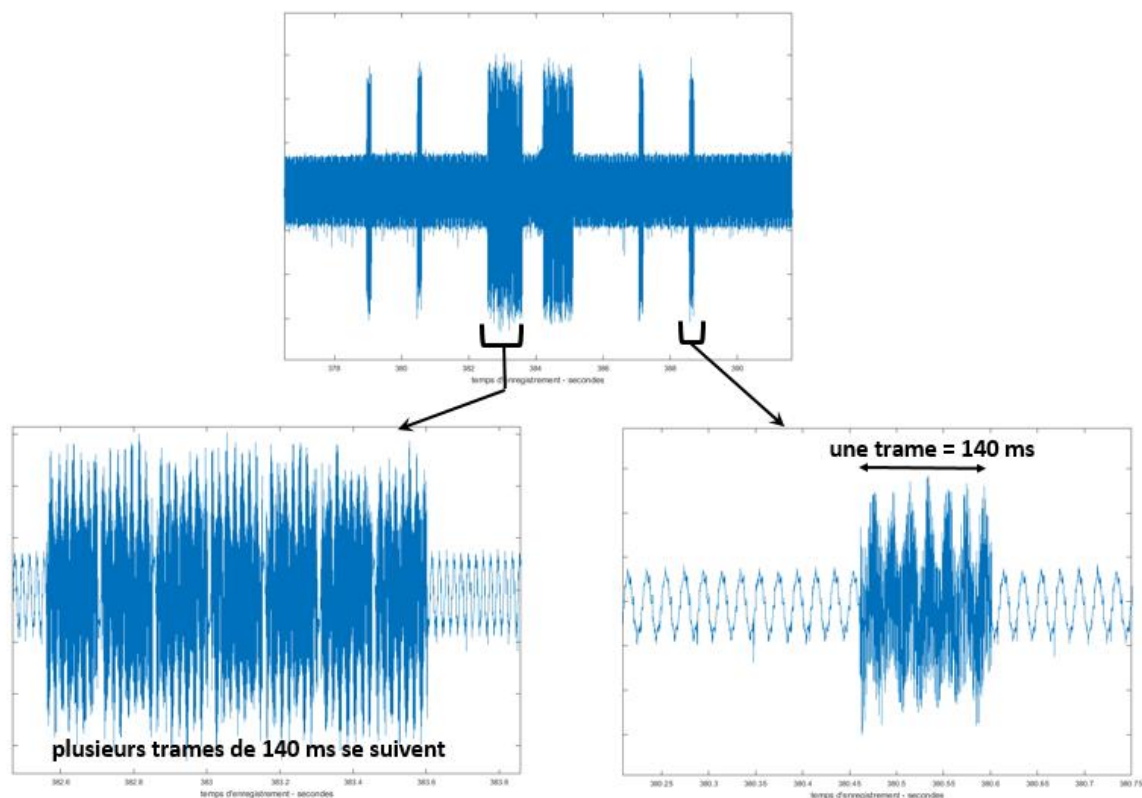


Figure 4-11: extrait de l'enregistrement temporel de trames de communication CPL Linky

L'ensemble des résultats est résumé dans les Table 4-2, Table 4-3 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, avec les niveaux maximum de champ magnétique mesurés et le nombre de trames de communications CPL estimé à partir des mesures de courant.

Point de mesure		Niveau maximum de champ magnétique Bande CPL Linky : 30 - 95 kHz					Valeur Limite d'exposition
		1 ^{ère} campagne	2 ^{ème} campagne	3 ^{ème} campagne	4 ^{ème} campagne	5 ^{ème} campagne	
		Sans communication CPL Linky	Avec communications CPL Linky du voisinage	Enedis augmente les requêtes CPL	Enedis augmente les requêtes CPL	Sans intervention d'Enedis	
A	dans l'entrée, devant le tableau électrique	$0,5 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$14,0 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$60,4 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$104,6 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$72,2 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
B	dans la salle de jeu	$0,5 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$2,3 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$6,7 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$8,1 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$6,5 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
C	dans le salon	$0,4 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$1,4 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$3,9 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$4,6 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$3,9 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
D	dans la chambre d'enfant au second niveau	$0,4 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$3,8 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$9,3 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$10,4 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	$8,8 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6.25 μT

Table 4-2 : résultats des mesures de champ magnétique in situ

Nombre moyen de trames de communications CPL Linky par minute Estimations basées sur des enregistrements d'au minimum 30 minutes				
1 ^{ère} campagne	2 ^{ème} campagne	3 ^{ème} campagne	4 ^{ème} campagne	5 ^{ème} campagne
Ancien compteur		Compteur Linky		
Sans communication CPL Linky	Avec communications CPL Linky du voisinage	Avec communications CPL Linky		
Sans intervention d'Enedis		Enedis augmente les requêtes CPL		Sans intervention d'Enedis
Pas de trames	4 à 6 trames / minute	30 à 40 trames / minute	30 à 40 trames / minute	4 à 6 trames / minute

Table 4-3 : estimation du nombre de trames de communications CPL Linky à partir des enregistrements de courant électrique

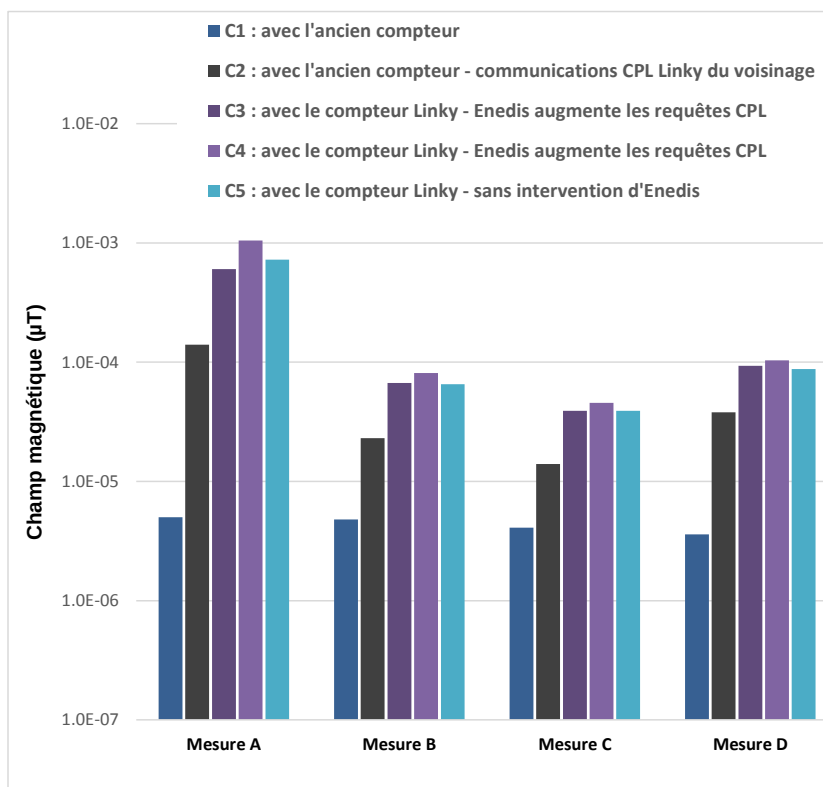


Figure 4-12 : synthèse des résultats du niveau maximum de champ magnétique

Lorsqu'Enedis n'est pas prévenu de notre intervention, entre 4 et 6 trames de communications CPL par minute circulent sur le réseau de l'appartement. Dans les cas où Enedis a, à la demande du CSTB, augmenté le nombre de requêtes du concentrateur, le nombre de trames est beaucoup plus élevé : de l'ordre de 30 à 40 par minute.

Qu'Enedis soit intervenu ou non, les niveaux maximum de champ magnétique mesurés sont semblables. La variabilité que l'on observe provient probablement des conditions de charges électriques présentes sur le réseau de distribution. Les conditions électriques dans l'appartement, en aval du compteur, ont été analysées et vérifiées afin d'être identiques pour toutes les campagnes de mesures. En revanche, nous ne maîtrisons pas les conditions électriques en amont du compteur (vers les autres compteurs et le concentrateur) qui sont forcément différentes entre deux campagnes de mesures. Comme vu en laboratoire (cf.3 -), les compteurs adaptent leur niveau d'émission aux conditions de charges du réseau.

Après installation du compteur dans l'appartement, les niveaux maximum de champ magnétique sont plus élevés (facteur 2 à 8) que dans le cas où les trames ne proviennent que des compteurs voisins.

Globalement, sur l'ensemble des campagnes de mesures réalisées, les niveaux maximum de champ magnétique généré par les trames de communications Linky sont entre 10 et 250 fois plus élevés que les niveaux de bruit ambiant. Toutes configurations de mesures

confondues, le niveau maximum de champ magnétique mesuré est environ 6 000 fois plus faible que la valeur limite d'exposition.

À partir de ces mesures de courant et de champ magnétique, il n'est pas possible d'identifier le type et l'émetteur des trames qui circulent sur le réseau : trames du compteur de l'appartement / du concentrateur / des autres compteurs, trames cyclique d'interrogation, de télé opération, de compteur répéteurs, etc.

4.4 - Mesures à proximité d'un concentrateur

Des mesures de champ magnétique ont été réalisées à proximité de postes de transformation HTA/BT équipés de concentrateurs Linky G1. Les sites retenus (Figure 4-13 à Figure 4-15) ont été choisis à partir d'une liste fournie par Enedis.

Sur chaque site, la mesure a consisté en la recherche autour du poste de transformation du point de niveau d'exposition maximum dans la bande de fréquences CPL Linky. Un enregistrement des spectres CPL Linky de champ magnétique est ensuite réalisé pendant 60 minutes. Cet enregistrement permet une estimation du nombre de trames de communication circulant sur le réseau et du niveau maximum de champ magnétique rayonné.



Figure 4-13: site PT1 « Fontenelle » - milieu urbain





Figure 4-14: site PT2 « Bigot » - milieu rural



Figure 4-15: PT3 « Collège Vaillant » - milieu urbain

Les Figure 4-16 à Figure 4-18 montrent les spectres de différentes trames de communications CPL pour les trois sites mesurés. Des trames de communication CPL G1 circulent régulièrement sur le réseau, soit de façon isolée soit regroupées en paquets de plusieurs trames, avec différents niveaux d'amplitude de champ magnétique. Il n'est pas possible de différencier le type de trame : trame issue d'un compteur ou requête issue du concentrateur.

La Table 4-4 donne les niveaux maximum de champs magnétiques mesurés qui sont entre 10 et 20 fois supérieurs au niveau maximum de bruit ambiant dans la bande de fréquences. Le niveau maximum mesuré est de $37 \times 10^{-5} \mu\text{T}$, soit 17 000 fois inférieur à la valeur limite d'exposition.

A partir des enregistrements effectués, le nombre de trames CPL Linky circulant sur le réseau à partir des concentrateurs est estimé à 4 à 6 trames par minute pour le poste de transformation situé en milieu rural et à 7 à 10 trames par minute pour les postes de transformation située en milieu urbain.

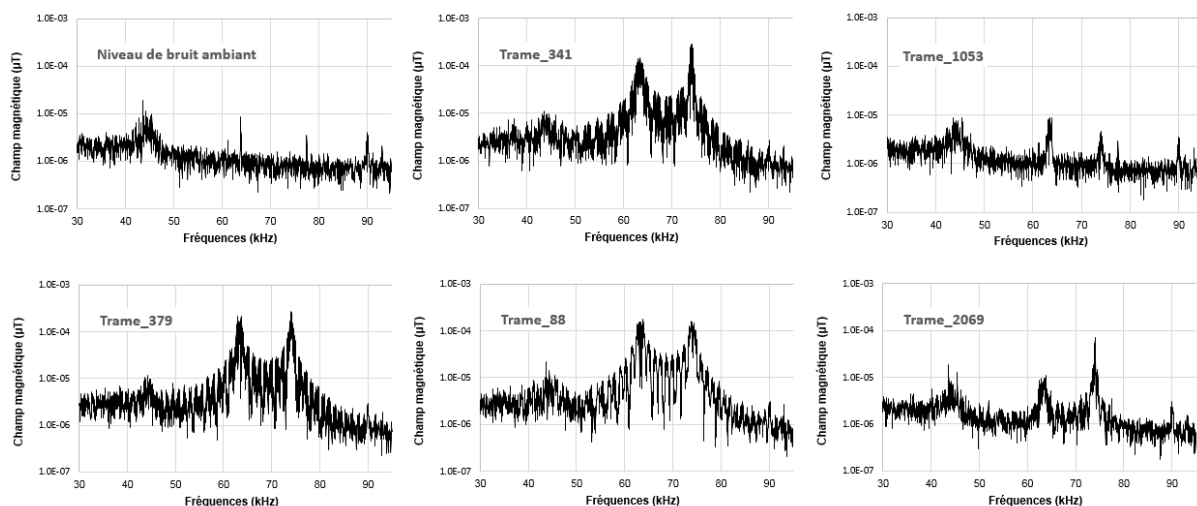


Figure 4-16: site PT1 « Fontenelle » - exemples de spectres de trames mesurées

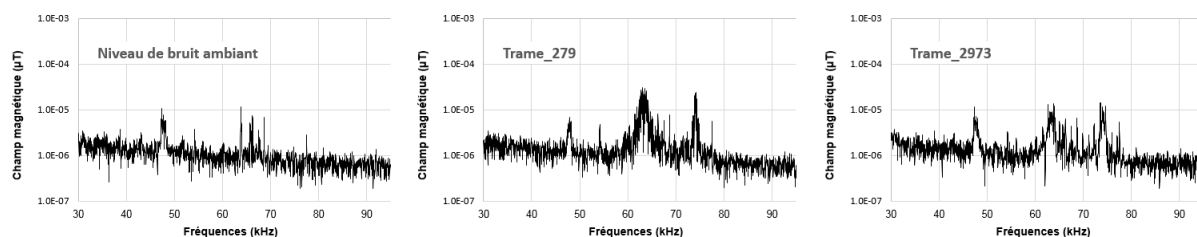


Figure 4-17: site PT2 « Bigot » - exemples de spectres de trames mesurées

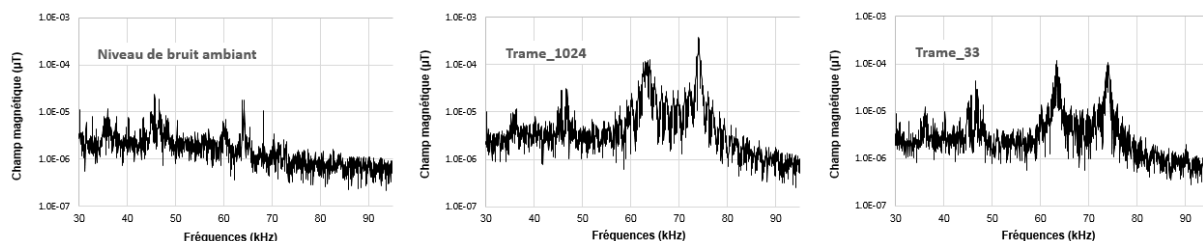


Figure 4-18 : site PT3 « Collège Vaillant » - exemples de spectres de trames mesurées

Point de mesure Postes de transformation électrique HTA/MT		Niveau maximum de champ magnétique Bande CPL Linky : 30 - 95 kHz			Estimation du nombre moyen de trames
		Sans signal CPL Linky	Avec signal CPL Linky	Valeur Limite d'exposition	
PT1	FONTENELLE	$1,9 \times 10^{-5} \mu T$	$37 \times 10^{-5} \mu T$	6,25 μT	7 à 9 trames CPL / minute
PT2	BIGOT	$1,2 \times 10^{-5} \mu T$	$11 \times 10^{-5} \mu T$	6,25 μT	4 à 6 trames CPL / minute
PT3	COLLEGE VAILLANT	$2,3 \times 10^{-65} \mu T$	$32 \times 10^{-5} \mu T$	6,25 μT	8 à 10 trames CPL / minute

Table 4-4 : niveaux maximum de champ magnétique et estimation du nombre moyen de trames autour des postes de transformation électriques

5 - CARACTERISATION DES SIGNAUX PRESENTS DANS LA BANDE DE FREQUENCES UTILISEES PAR LES COMMUNICATIONS CPL LINKY

5.1 - Caractérisation des champs rayonnés par d'autres équipements dans la bande Linky

Des mesures ont été réalisées afin de caractériser le bruit et les signaux présents dans la bande de fréquences CPL Linky, entre 30 kHz et 95 kHz, en l'absence de communications CPL. Dans cette bande de fréquences dites « intermédiaires », les sources de bruit et les signaux parasites sont nombreux, notamment en présence d'alimentations à découpage et de dispositifs électroniques utilisés dans de nombreux objets (chargeurs, blocs d'alimentation, lampes fluo compactes ou à LED, etc.). La tension du secteur (230 V alternatif) est transformée en une tension continue par l'intermédiaire de la génération d'impulsions temporelles courtes à hautes fréquences (hachage), qui peuvent impacter la bande de fréquences CPL Linky.

Des mesures de champ magnétique (mode rayonné) et de courant électrique (mode conduit) ont été réalisées dans quelques configurations pertinentes en matière de bruit et signaux parasites aux fréquences CPL Linky.

5.1.1 - Mesures de champ magnétique (mode rayonné)

Les Figure 5-1 à Figure 5-5 montrent des spectres de champ magnétique mesurés *in situ*, dans la bande de fréquences 30 kHz – 95 kHz utilisée par le CPL Linky : sous des lampes (tubes fluorescents, LED), à proximité d'écrans plats d'ordinateur. Sur chaque graphe est donné pour comparaison le niveau de champ magnétique mesuré en l'absence de toute source rayonnante (mesures réalisées dans la chambre anéchoïque du CSTB).

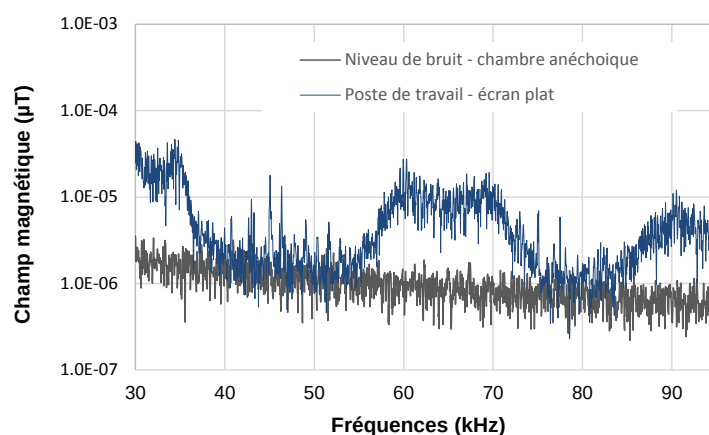


Figure 5-1: niveau de champ magnétique dans la bande de fréquences utilisée pour le CPL Linky
Mesure sur un poste de travail, devant un écran plat d'ordinateur

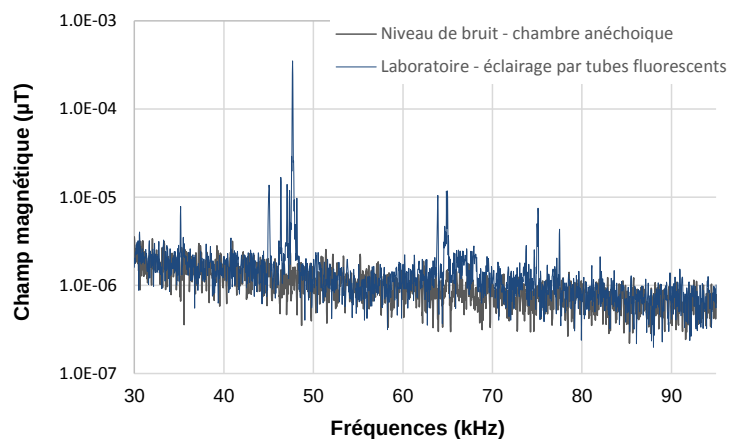


Figure 5-2: niveau de champ magnétique dans la bande de fréquences utilisée pour le CPL Linky
Mesure dans un laboratoire éclairé par des tubes fluorescents à ballast électronique

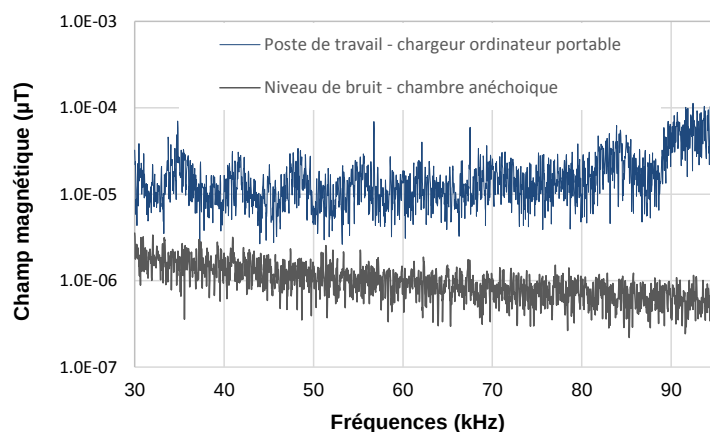


Figure 5-3: niveau de champ magnétique dans la bande de fréquences utilisée pour le CPL Linky
Mesure sur un poste de travail, à 20 cm d'un bloc chargeur / alimentation d'ordinateur portable

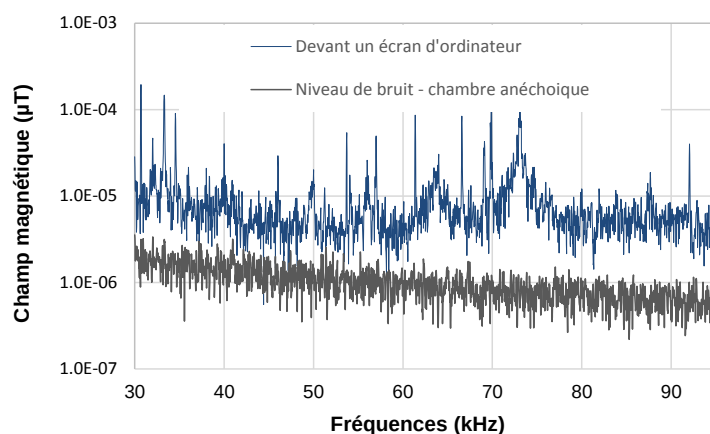


Figure 5-4: niveau de champ magnétique dans la bande de fréquences utilisée pour le CPL Linky
Mesure dans un logement, sous une lampe à LED 13W (distance : 65 cm)

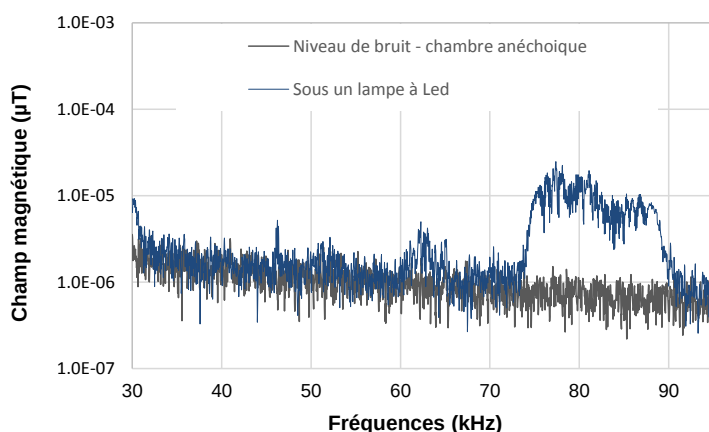


Figure 5-5: niveau de champ magnétique dans la bande de fréquences utilisée pour le CPL Linky
Mesuré dans un logement, devant un écran plat d'ordinateur

La Table 5-1 donne les niveaux maximum de champ magnétique relevés dans les cinq configurations mesurées.

Point de mesure	Niveau de champ magnétique Bande CPL Linky : 30 - 95 kHz	
	Niveau maximum	Valeur Limite d'exposition
Sous des tubes fluorescents (laboratoire)	$44,3 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
Devant un écran plat d'ordinateur (poste de travail)	$5,9 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
A 20 cm d'un chargeur d'ordinateur portable	$14,1 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
Devant un écran plat d'ordinateur (poste de travail)	$5,1 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT
Sous un luminaire (lampe LED 13 W)	$25,5 \times 10^{-5} \mu\text{T}$	6,25 μT

Table 5-1 : synthèse des niveaux maximum de champ magnétique mesurés dans la bande de fréquences utilisée par le CPL Linky

5.1.2 - Mesures de courant électrique (mode conduit)

Des mesures de courant électrique circulant dans un câble ont été réalisées avec différentes charges : unité centrale d'ordinateur, lampe fluo compacte, lampe à LED. Les Figure 5-6 à Figure 5-8 montrent les résultats avec la forme temporelle du courant électrique et le spectre dans la bande de fréquences utilisée par le CPL Linky.

Configuration de mesure	Mesures dans la bande de fréquences CPL Linky 30 kHz - 95 kHz	
	Valeur du courant (rms)	Fréquence
Unité centrale d'ordinateur	22,4 mA	~69 kHz
Lampe LED de 3 W	1,5 mA	entre 62 et 67 kHz
Lampe fluo compacte	0,2 mA	entre 42 et 50 kHz

Table 5-2 : synthèse des niveaux maximum de courant électrique mesurés dans la bande de fréquences utilisée par le CPL Linky

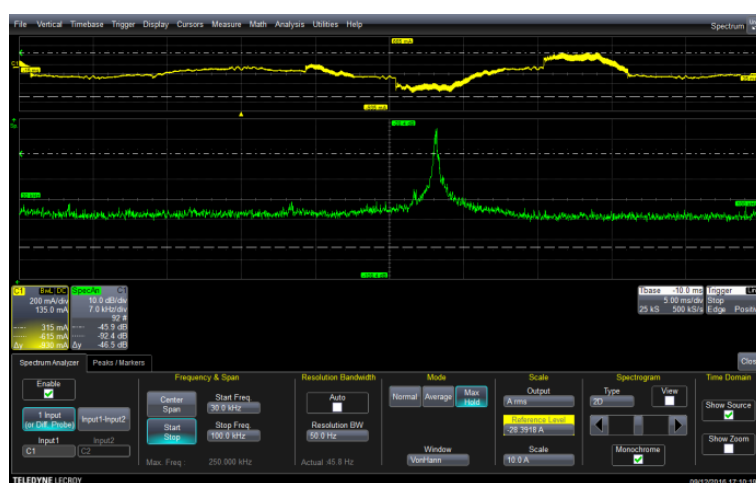


Figure 5-6: courant électrique (en haut) et spectre dans la bande 30 kHz – 95 kHz (en bas)
Câble branché sur une unité centrale d'ordinateur

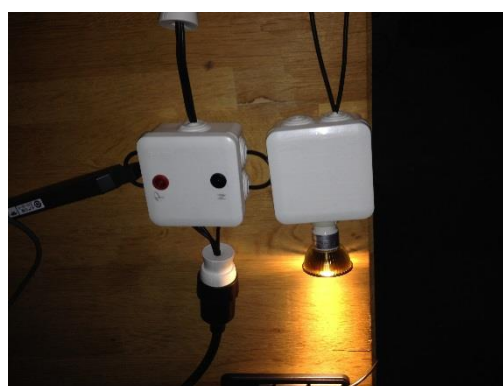


Figure 5-7: courant électrique (en haut) et spectre dans la bande 30 kHz – 95 kHz (en bas)
Câble branché sur une lampe LED de 3W



Figure 5-8: courant électrique (en haut) et spectre dans la bande 30 kHz – 95 kHz (en bas)
Câble branché sur une lampe fluo compacte

5.2 - Comparaison de signaux Linky avec des signaux d'autres équipements

Des mesures *in situ* ont été réalisées afin de comparer le niveau de champ magnétique d'une trame CPL Linky G1 et le niveau de champ magnétique d'un signal électrique parasite présent dans la bande de fréquences CPL Linky :

- point de mesure situé dans le couloir d'une maison équipée d'un compteur Linky, sous un luminaire équipé d'une lampe fluo compacte, à une distance de 60 cm de la lampe – cf. Figure 5-9 ;
- point de mesure situé dans le salon d'un appartement équipé d'un compteur Linky, devant l'écran d'un ordinateur portable. À une distance de 1,5 mètre de l'écran, le signal Linky est visible au-dessus du niveau de bruit. À une distance de 30 cm de l'écran, le signal Linky est noyé dans les signaux parasites large bande générés par le rayonnement de l'écran – cf. Figure 5-10 ;
- point de mesure situé dans la cuisine d'une maison équipée d'un compteur Linky CPL G1, à 20 cm devant une plaque à induction en fonctionnement, au maximum de sa puissance – cf. Figure 5-11.

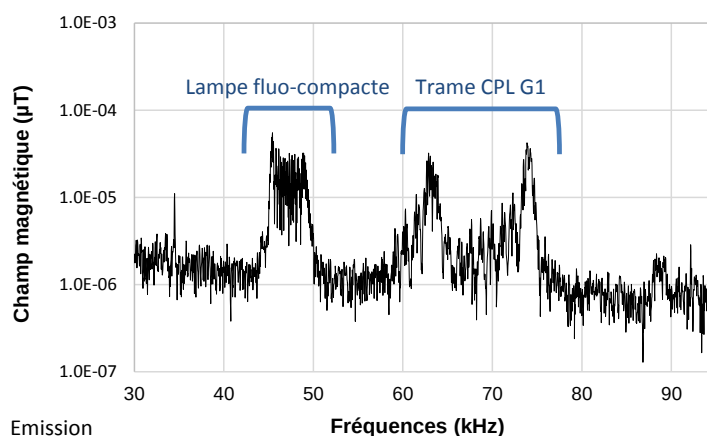


Figure 5-9: point de mesure situé sous une lampe fluo compacte

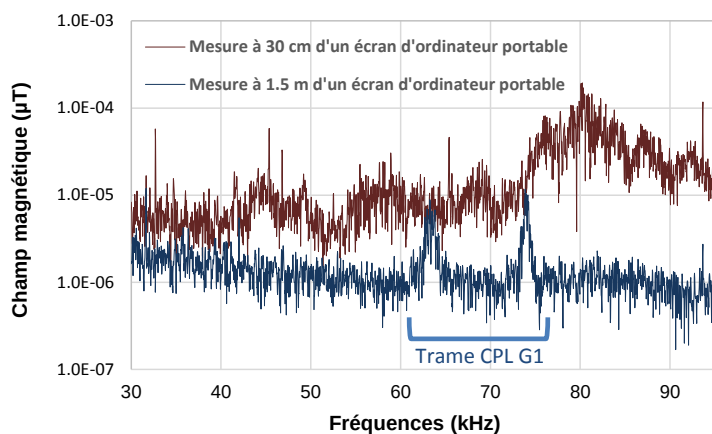


Figure 5-10: point de mesure situé devant un écran d'ordinateur portable

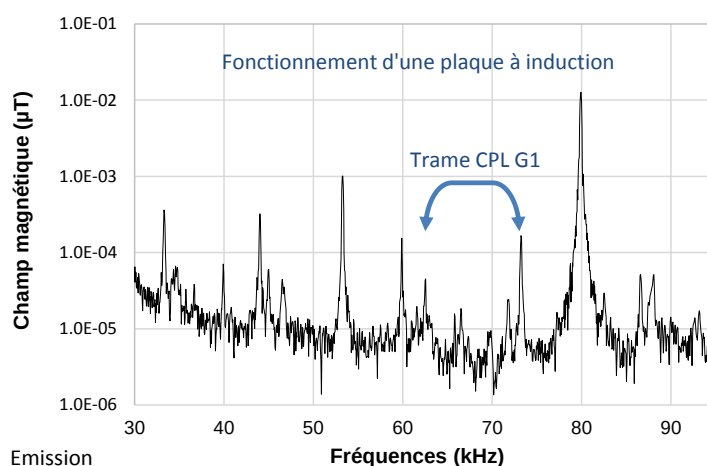


Figure 5-11: point de mesure situé devant une plaque à induction en fonctionnement

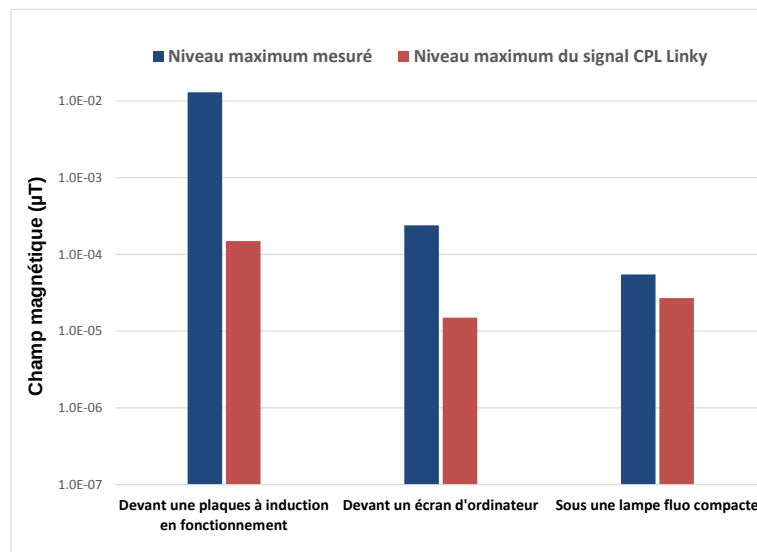


Figure 5-12: comparaison entre le signal Linky et d'autres sources de rayonnement

6 - CONCLUSIONS

Ces campagnes de mesures en laboratoire et *in situ* ont permis d'enrichir les connaissances sur l'exposition induite par les communications CPL générées par le système Linky.

L'ensemble des mesures ont été réalisées dans la bande de fréquences utilisée par les communications CPL Linky, entre 30 kHz et 95 kHz. Ont été réalisées conjointement des mesures de courant électrique, permettant de visualiser et enregistrer les signaux de communications CPL et des mesures de champ magnétique rayonné.

La caractérisation de l'émission des signaux CPL est relativement complexe du fait du fonctionnement propre du compteur Linky et de l'interdépendance entre les grandeurs électriques. Dans le respect du gabarit fixé par la norme NF EN 50065-1, le niveau de tension émis en CPL par le compteur est adapté en temps réel aux conditions d'impédance du réseau, que ce soit en amont du compteur, vers le concentrateur, ou en aval vers les charges électriques dans le logement. Les courants électriques CPL qui circulent sur les câbles du réseau sont liés à cette tension d'émission mais aussi aux charges électriques présentes.

En matière d'émission CPL, il n'y a pas de découplage entre l'amont et l'aval du compteur. En aval, les trames de communications circulent indifféremment dans l'ensemble du câblage électrique, avec un niveau relativement faible pour des charges résistives et nettement plus élevé pour des charges capacitives.

Les niveaux de champ magnétique mesurés en laboratoire avec les compteurs G1 et G3 prêtés par Enedis varient donc en fonction des charges électriques mais aussi de la longueur des câbles utilisés et de la distance entre le point de mesure et le câble. Toutes configurations de mesure confondues, à 20 cm du câble le niveau maximum de champ magnétique mesuré en laboratoire est environ 15000 fois inférieur à la valeur limite d'exposition.

Les différentes campagnes de mesures réalisées *in situ* ont permis d'enregistrer des trames CPL Linky en fonctionnement normal, pendant la journée et au cours d'une nuit (trames de collecte d'indice de consommation), de façon indépendante d'Enedis. Des mesures ont été réalisées à proximité de concentrateurs et de compteurs G1. Il y a en moyenne entre 4 et 10 trames par minute qui circulent sur le réseau. Les trames émises par le concentrateur et chaque compteur Linky circulent indifféremment sur l'ensemble du réseau, avec des niveaux qui varient en fonction des charges électriques présentes et des longueurs de câbles parcourues.

Il est impossible d'identifier le type de trame dont il s'agit : tâche cyclique d'interrogation, télé-opération, trame issus d'un autre compteur de la grappe, du concentrateur, d'un compteur en fonction « répéteur », etc.

La circulation de ces courants électriques CPL dans le réseau électrique génère un champ magnétique qui décroît lorsque l'on s'éloigne du câble. Tous les niveaux de champ magnétique mesurés *in situ* sont très largement inférieurs aux valeurs limites d'exposition. Toutes configurations de mesure *in situ* confondues, le niveau maximum de champ magnétique mesuré est environ 6000 fois inférieur à la valeur limite d'exposition.

L'exposition liée aux communications CPL Linky est donc très faible par rapport à la valeur limite d'exposition, avec un caractère quasi-permanent (signal intermittent avec un rapport cyclique élevé).

Dans un logement situé à proximité de logements équipés de compteurs communicants Linky, l'exposition aux signaux CPL existera, qu'il y ait ou non un compteur communicant dans ce logement. Les niveaux d'exposition seront néanmoins plus faibles en l'absence de compteur communicant.

Enfin cette exposition aux communications CPL est du même ordre de grandeur que des signaux parasites présents dans cette bande de fréquences, liés aux équipements électriques domestiques : ballasts de lampes fluo compactes, drivers de LED, chargeurs et blocs d'alimentation électrique, écran d'ordinateur, plaques à induction, etc.