

Bruit et champ électromagnétique rayonné

1 Introduction

Le réseau électrique domestique est partagé par plusieurs appareils électriques, ceux non communicants tels que les appareils électroménagers mais aussi ceux communicants tels que les systèmes à courant porteur en ligne. Les perturbations électromagnétiques existant sur ce réseau électrique sont essentiellement générées par les appareils électroménagers dotés la plupart du temps d'une alimentation à découpage. Il faut noter que les systèmes CPL sont constamment exposés au bruit généré par ces dispositifs électriques ce qui réduit considérablement leur performance. Dans ce cas, les systèmes CPL sont considérés comme victime. Quelques fois, des signaux HF émis par les modems CPL sont rayonnés par les câbles électriques, ce qui peut perturber par d'exemple les services Radio ou d'autres dispositifs de télécommunication tels que les modems VDSL utilisant presque la même bande de fréquences. De plus, aucune norme CEM rayonné, ne semble être applicable sur la technologie CPL dans la bande 150kHz-30MHz.

Ce chapitre est divisé en deux parties. La première porte sur le bruit généré par les appareils électriques domestiques. La deuxième concerne l'étude du champ électromagnétique rayonné par le réseau électrique lors d'une transmission CPL. L'évaluation du bruit généré sur le réseau électrique et l'estimation du champ magnétique rayonné par ce dernier, sont réalisées par une approche purement expérimentale.

Nous présenterons en premier lieu l'état de l'art de la caractérisation du bruit généré sur le réseau électrique en détaillant les différentes méthodes de classification. La méthodologie de mesure sera décrite et nous analyserons quelques résultats de mesure. Par la suite, nous nous focaliserons sur l'étude du champ électromagnétique rayonné. Nous décrirons la campagne de mesure du champ électromagnétique rayonné. Pour cette campagne, deux géométries de réseau électrique ont été considérées. Ils seront décrits, de même que le dispositif de mesure et la démarche suivie.

Par la suite, nous analyserons les résultats obtenus afin d'étudier l'impact de la géométrie du réseau électrique et du type de flux vidéo émis par les modems CPL sur le champ électromagnétique rayonné dans la bande 150kHz-30MHz. Nous comparerons le

champ électromagnétique rayonné par un câble électrique écrané à celui d'un câble électrique non écrané noté RO2V. Nous ferons le lien entre le courant du mode commun et le champ électromagnétique rayonné. Enfin nous présenterons la mesure de la dissymétrie du réseau électrique et nous la comparerons à l'allure des champs électrique et magnétique rayonnés. Nous confronterons les résultats obtenus aux restrictions relatives à l'exposition des individus aux champs électromagnétiques.

2 Réseau électrique et bruits

2.1 Classification des bruits sur le réseau électrique

Les appareils électriques domestiques dotés d'une alimentation à découpage génèrent des perturbations électromagnétiques. Elles proviennent soit du réseau électrique domestique lui-même soit d'un réseau voisin. Dans ce cas, elles se propagent le long de l'installation électrique et traversent le compteur électrique, le disjoncteur principal et le reste des composants du réseau avant d'arriver au niveau de la prise à laquelle le modem récepteur ou émetteur est connecté. Le simple fait que ces perturbations conduites soit présentes sur le réseau et en n'importe quel point pourra engendrer une baisse de performance du modem CPL.

L'impact du bruit sur la transmission CPL est illustré par une mesure de débit effectuée lors d'une transmission CPL entre deux modems HPAV en présence d'une alimentation à découpage. Le dispositif de mesure est représenté sur la Figure 115. Il est composé de deux transformateurs d'isolement monophasés, de deux filtres de ligne monophasés passe-bas (de marque Schaffner), de deux RSIL (Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne), de deux coupleurs CPL. La liaison électrique entre les deux coupleurs est réalisée avec des câbles coaxiaux entre lesquels est placé un atténuateur HF réglable par pas de 1dB. Il permettra d'atténuer le signal CPL entre les deux modems.

Le bruit mesuré est de type impulsif asynchrone avec la tension de secteur. La Figure 116 présente le bruit généré par l'alimentation à découpage sur le réseau électrique [58].

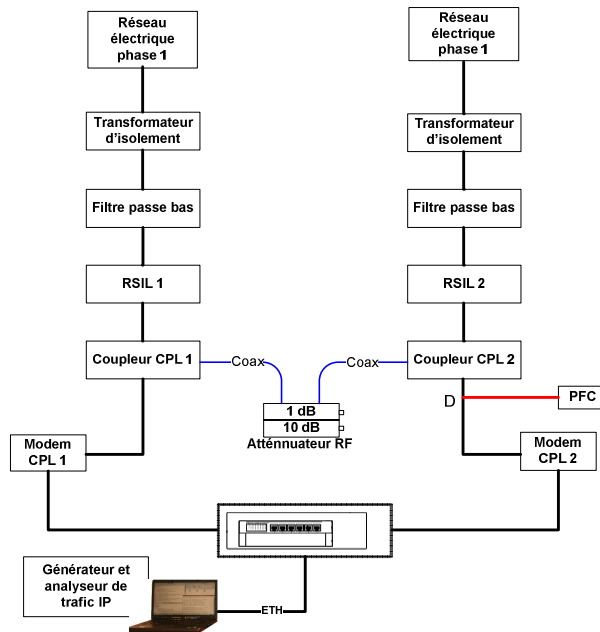


Figure 115. Dispositif de mesure de l'impact du bruit sur le débit

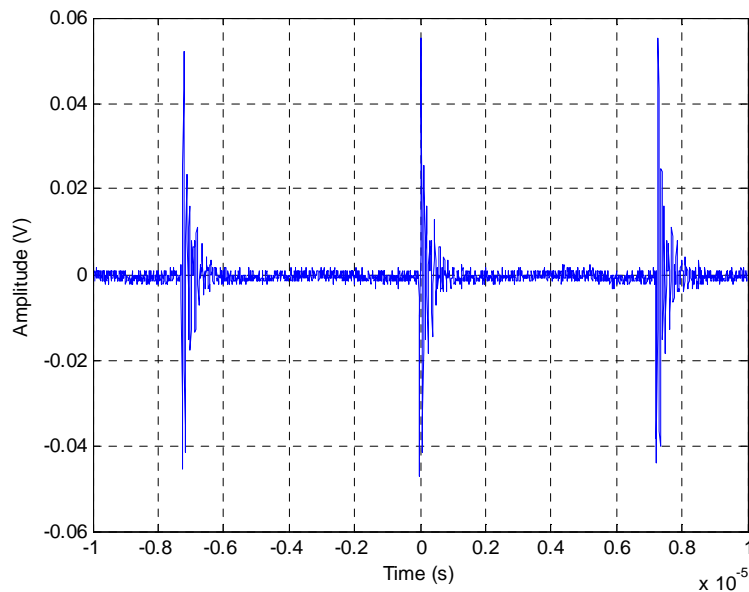


Figure 116. Bruit généré par une alimentation à découpage

Le trafic IP entre les deux modems est généré et mesuré en utilisant un générateur de trafic IP nommé IxChariot. Le flux de données entre les deux modems CPL est évalué et mesuré sur une minute en utilisant le protocole TCP-IP. Les résultats de mesure sont présentés sur la Figure 117. Suivant que le PFC est connecté ou non au point D, nous constatons une chute considérable du débit Ethernet. Il décroît de 70Mbits/s à 45Mbits/s lors de la connexion de l'appareil.

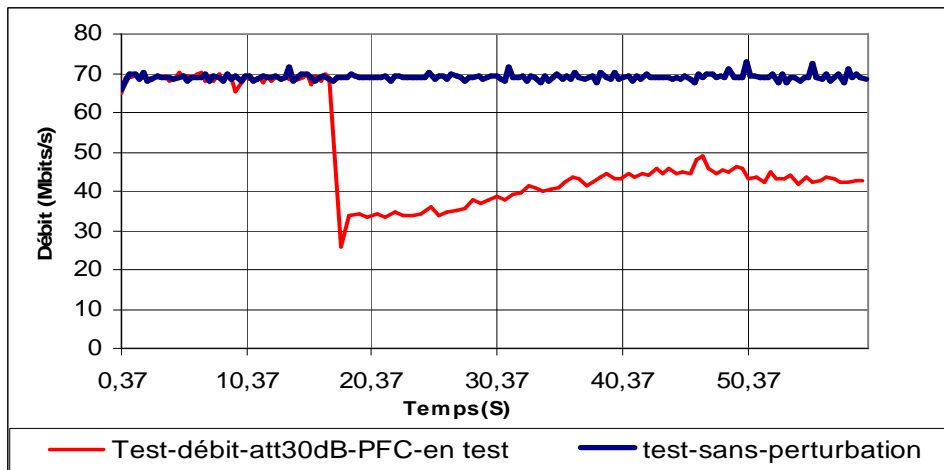


Figure 117. Impact de l'alimentation à découpage sur la transmission CPL

La caractérisation des perturbations électromagnétiques générées sur le réseau électrique semble une étape nécessaire afin d'améliorer la robustesse des systèmes de transmission par courant porteur. Les premiers travaux les plus connus dans le domaine sont ceux de Zimmerman et Dostert [59]. Les perturbations EM y sont classées en cinq catégories :

- le bruit de fond coloré,
- le bruit bande étroite,
- le bruit impulsif périodique asynchrone,
- le bruit impulsif synchrone,
- le bruit impulsif asynchrone.

Cette approche est basée sur une longue observation du bruit dans le domaine temporel (89h d'observation dans trois milieux différents). Le bruit impulsif a été caractérisé par une méthode statistique en fonction du temps (amplitude, fréquence d'apparition, puissance, durée de l'impulsion et le temps d'arrivée des impulsions). Suite à ces travaux, un modèle statistique résumant le comportement aléatoire du bruit a été réalisé en utilisant les données statistiques issues de la mesure (distribution de probabilité du temps intermédiaire entre deux impulsions dit "temps d'interarrivée" et de la durée de l'impulsion) et la chaîne de Markov.

D'autres études [60] ont montré que le bruit généré par les appareils électriques domestiques peut se diviser en trois types : stationnaire, cyclo-stationnaire et impulsif. Une classification du bruit impulsif mesuré sur le réseau électrique est aussi proposée dans [61]. La classification est basée sur la durée, le spectre et le temps d'arrivée des impulsions. Une

autre étude récente de caractérisation des perturbations électromagnétiques observées par mesure sur le réseau électrique est présentée dans [3] afin de remédier aux faiblesses des modems CPL face aux bruits impulsifs périodiques. Elle consiste à diviser les perturbations électromagnétiques observées sur le réseau électrique en plusieurs classes en considérant trois phénomènes temporels : phénomènes permanents, phénomènes apériodiques et phénomènes périodiques synchrones.

Les phénomènes permanents concernent les perturbations produites par les appareils électriques en marche et qui sont omniprésents durant toute la durée de la transmission CPL. Citons par exemple les ondes radio émises par des stations proches et qui se couplent au réseau électrique, un téléviseur en marche ou le bruit de fond du réseau électrique généralement caractérisé par une densité spectrale décroissante en fonction de la fréquence pour atteindre des valeurs allant de -110dBm/Hz à -140dBm/Hz. Les phénomènes apériodiques se présentent généralement lors de la mise en marche d'un dispositif électrique. Leur observation n'est pas une tâche facile car les variations produites sont transitoires et très rapides. Les phénomènes périodiques synchrones avec le secteur 50Hz, ou 60Hz selon les pays. Le temps d'interarrivée des impulsions est égal à 10ms (tension secteur redressée).

Les bruits sont ensuite répartis en sous classes selon ces trois phénomènes comme suit :

- Phénomènes permanents :
 - bruit de fond coloré,
 - bruit bande étroite,
 - bruit impulsif périodique asynchrone.
- Phénomènes apériodiques :
 - bruit impulsif apériodique,
 - variation apériodique des phénomènes périodiques synchrones.
- Phénomènes périodiques synchrones à la tension secteur :
 - bruit impulsif périodique synchrone avec le 50Hz,
 - variation périodique synchrone du bruit stationnaire.

Chaque classe de bruit est caractérisée par une approche statistique en fonction de l'amplitude du bruit, du nombre d'observations du bruit sur la durée de mesure, de la durée d'interarrivée des impulsions ou de rafales d'impulsions. Le modèle proposé prend en compte l'aspect variable du bruit en fonction du temps et de la fréquence en utilisant les statistiques issues de la mesure.

La plupart des approches proposées dans la littérature se basent sur une mesure de bruit directement réalisée au niveau du réseau électrique et non pas à la source de perturbation. Une approche de modélisation du bruit impulsif fondée sur des mesures de perturbations électromagnétiques effectuées directement aux niveaux des sources perturbatrices a été récemment proposée [62]. Les résultats de mesure sont par la suite divisés en six classes distinctes.

2.2 Méthodologies de mesure du bruit

Ils existent deux méthodes de mesure des perturbations EM conduites sur le réseau électrique. La première est dite spectrale. Elle consiste à mesurer directement sur le réseau électrique la densité spectrale du bruit à l'aide d'un analyseur de spectre et un coupleur. Ce dernier permet de filtrer la composante 50Hz qui s'avère fatale pour l'ensemble des équipements de mesure. L'utilisation d'un analyseur de spectre est justifiée par sa forte sensibilité, son faible bruit de fond et sa grande précision de mesure. Cette méthode est bien adaptée à la mesure des bruits stationnaires à faible densité spectrale mais elle reste inadéquate pour les mesures des phénomènes transitoires. Cette limitation est due à la structure de l'analyseur de spectre. Son principe de base consiste à balayer la plage fréquentielle étudiée dans le temps en mesurant le niveau de bruit fréquence par fréquence. Pour que la mesure de la DSP d'un signal soit fiable, il faut que celui-ci soit constant pendant le temps de balayage de l'analyseur de spectre. L'apparition d'un bruit impulsif est un phénomène très rapide. Sa durée est nettement inférieure au temps de balayage minimal de l'analyseur de spectre. L'utilisation de ce dernier ne permet donc pas la caractérisation de ce type de bruit.

La deuxième approche est dite temporelle. Elle consiste à mesurer la variation du bruit dans le temps en utilisant un oscilloscope numérique et un coupleur CPL. L'oscilloscope permet d'observer aisément les phénomènes transitoires rapides en utilisant l'option d'acquisition de signal sur une durée plus au moins longue. Le déclenchement s'effectue par rapport à un niveau de tension fixe qui dépend des niveaux de bruit à observer.

Dans certains travaux [27], l'oscilloscope est remplacé par une carte d'acquisition installée sur un ordinateur et couplée à un dispositif d'acquisition du temps d'occurrence des impulsions. Il permet de mémoriser le temps d'occurrence dans chaque segment de mesure dont la durée est égale à $650\mu\text{s}$. Les données de mesure sont par la suite enregistrées sur l'ordinateur et traitées afin de caractériser les perturbations observées.

Dans notre étude nous nous sommes particulièrement intéressés à la caractérisation du bruit généré par les appareils électriques domestiques dans le domaine temporel. Pour cela nous avons adopté le procédé de mesure décrit dans [3]. Le dispositif de mesure est représenté sur la Figure 118. Il est composé d'un coupleur CPL, d'un RSIL et d'un oscilloscope numérique.

Le coupleur CPL permet de filtrer les signaux de basses fréquences et particulièrement la composante 50Hz. Son impédance d'entrée est égale à 50Ω . Il permet aussi de réaliser les mesures en mode différentiel. Le RSIL alimente les équipements à tester et assure la reproductibilité des mesures.

L'oscilloscope utilisé est capable d'acquérir 20.10^9 échantillons par seconde sur une seule voie. Dans notre cas la fréquence d'échantillonnage est fixée à 100MHz afin de pouvoir observer le bruit jusqu'à 50MHz. L'acquisition de la mesure est déclenchée manuellement pour éviter les déclenchements intempestifs généralement provoqués par les bruits impulsifs présents sur le réseau électrique. La durée de l'acquisition est réglée à 100ms.

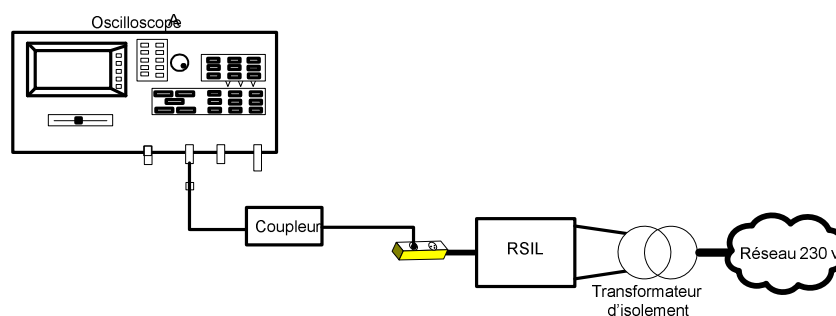


Figure 118. Dispositif de mesure temporelle du bruit sur le réseau électrique

Les appareils électriques domestiques caractérisés en terme de bruit sont :

- un four micro onde,
- une ampoule économique,
- un écran de télévision à tube cathodique,
- deux alimentations d'ordinateur portable,

- deux chargeurs de téléphone portable,
- une machine à café,
- deux types de robot mixeur,
- deux alimentations de modem ADSL,
- une machine à laver.

2.3 Analyse des résultats de mesure

Chaque signal mesuré à l'aide de l'oscilloscope est divisé en 2441 segments temporels de 40,96 μ s. Cette durée correspond à la longueur temporelle d'un symbole OFDM généré par les modems CPL HP-AV. Une transformée de Fourier discrète (TFD) est appliquée sur chaque fragment afin d'estimer sa variation en fonction de la fréquence dans la bande 150kHz-50MHz. La taille de la fenêtre de la TFD est égale à 4096 points. La représentation d'une grandeur en fonction du temps et de la fréquence est nommée spectrogramme. Ainsi nous analyserons la variation temporelle et fréquentielle du bruit généré par chaque appareil électrique testé.

Les Figure 119 et Figure 120 présentent deux résultats de mesure de bruit généré respectivement par une lampe basse consommation et par un chargeur de téléphone portable. Nous constatons que la variation du bruit généré par ces deux derniers est périodique et synchronisée avec la tension de secteur (50Hz). Cet effet est provoqué par la présence du redresseur à filtrage capacitif commun aux deux équipements testés. Pendant le temps de conduction des diodes apparaît un train d'impulsions généré par l'ouverture et la fermeture d'un interrupteur électronique présent dans le convertisseur de puissance placé derrière l'étage de redressement. En effectuant un agrandissement de chaque courbe, pendant la durée de conduction des diodes, nous constatons que l'écart temporel entre les pics est de l'ordre de la période de commutation de ce type de dispositif électrique (20kHz-30kHz). Cette variation est de type périodique asynchrone.

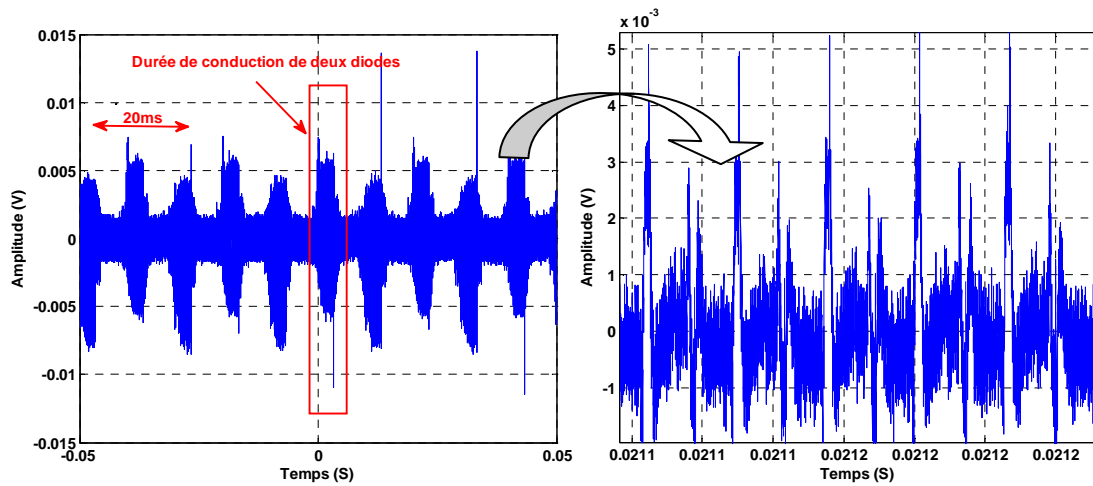


Figure 119. Bruit généré par une lampe basse consommation

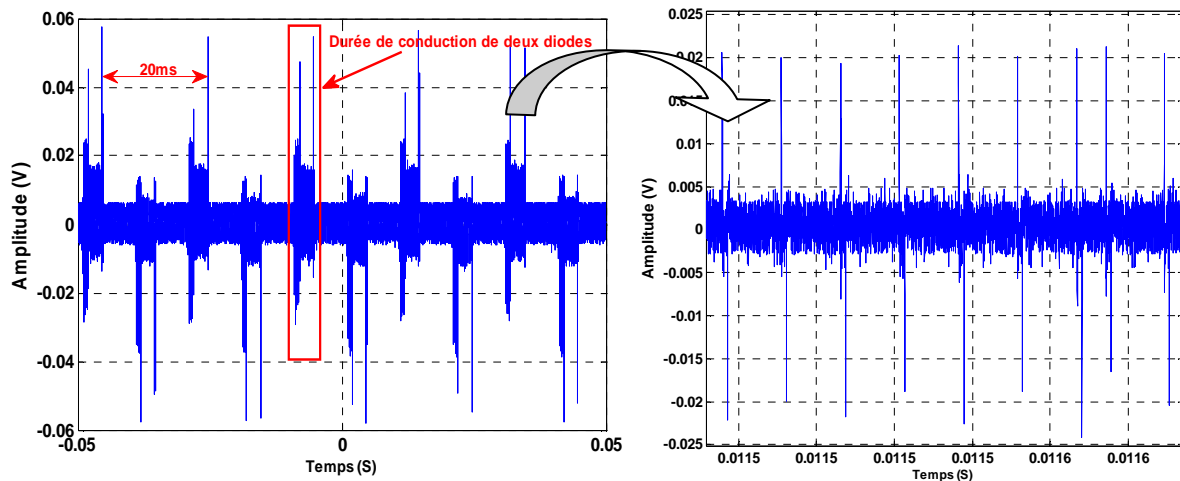


Figure 120. Bruit généré par le chargeur de téléphone portable

Les spectrogrammes des bruits générés par les deux équipements considérés sont représentés sur la Figure 121. Nous pouvons constater que l'amplitude spectrale du bruit est maximale en basse fréquence pendant les instants de conduction des diodes et décroît en fonction de la fréquence. Le bruit généré par le chargeur de téléphone portable est visible sur une bonne partie de la bande de fréquences étudiée, de 150kHz à 10MHz et de 15MHz à 25MHz. De plus, nous remarquons une perturbation omniprésente autour de 26MHz.

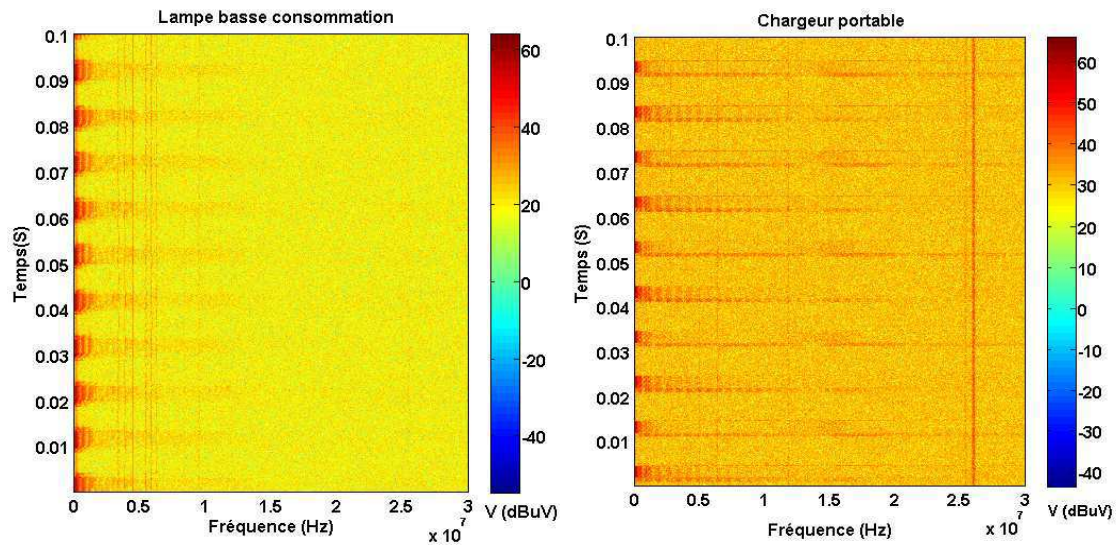


Figure 121. Spectrographe du bruit généré par la lampe basse consommation et par le chargeur de téléphone

La Figure 122 représente le bruit mesuré sur le réseau électrique en branchant les équipements électriques testés. Nous constatons que la variation du signal est périodique synchrone avec la période de la tension secteur. Son amplitude crête-à-crête est plus faible que celle du bruit mesuré directement sur chaque équipement. Cette atténuation est engendrée par le comportement fréquentiel du réseau électrique.

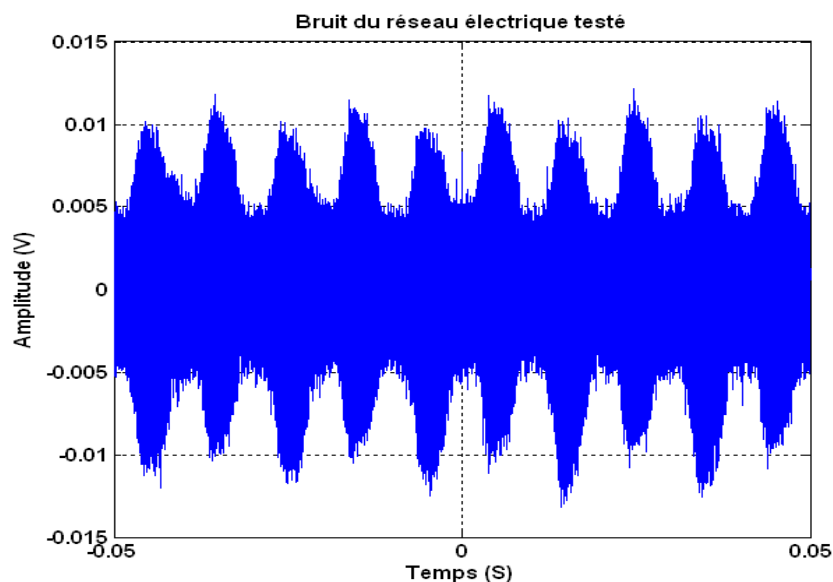


Figure 122. Bruit mesuré sur le réseau électrique

L'analyse des résultats de mesure indique que les convertisseurs de puissance présents dans ces équipements sont les principales sources du bruit mesuré sur le réseau électrique

domestique. La variation du bruit généré est périodique synchrone composé de plusieurs pics périodiques asynchrones.

Après la caractérisation du réseau électrique en terme de bruit, en mode conduit, généré par les appareils électriques, nous allons aborder le champ électromagnétique rayonné par un réseau électrique lors d'une transmission CPL.

3 Rayonnement électromagnétique généré par une transmission CPL

3.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre 1 le statut normatif de la technologie CPL en soulignant le nombre de propositions au sein des organismes de standardisation du point de vue CEM. A ce jour aucune norme n'a été validée et seule la norme EN55022 reste applicable en terme de susceptibilité. Cependant, elle ne renseigne pas le niveau de champ électromagnétique rayonné par les modems CPL dans la bande 150kHz-30MHz. Parallèlement, les limites du niveau de perturbations émises en mode conduit, imposées par cette norme dans la bande 150kHz-30MHz, ne sont pas toujours respectées par les produits CPL commercialisés en Europe. En revanche les niveaux plafonds sont respectés dans le cas où on considère le réseau électrique comme un accès télécommunication, caractérisé par 36dB de LCL (Longitudinal Conversion Loss). Dans ce cas, la norme est moins exigeante. L'application de cette norme dépend donc de son interprétation. Les résultats de mesure présentés dans [63] montrent que le champ électrique rayonné dans la bande 30MHz-100MHz par un modem CPL HPAV ne respecte pas les limites imposées par la norme EN55022 pour les appareils de classe B.

Le niveau de champ mesuré reste en dessous du niveau limite pour les appareils de classe A. Cette étude montre la possibilité d'exploitation des fréquences au delà de 30MHz, sans interférer avec le service Radio FM, afin d'augmenter le débit des systèmes actuels. De plus, le standard IEEE1901 a déjà prévu l'extension de la bande fréquentielle actuelle pour aller jusqu'à 50MHz pour un débit physique de 400Mbit/s et aucune norme CEM n'a été clairement établie à ce jour. Sachant qu'il existe plusieurs services radio civil et militaire utilisant des fréquences situées dans la bande CPL, les spécifications actuelles prévoient l'extinction des fréquences porteuses correspondantes lors d'une transmission afin de remédier aux problèmes d'interférences. La Figure 123 représente le spectre CPL utilisé par

les modems HPAV. Les trous spectraux correspondent aux fréquences éteintes, ce qui minimise les interférences entre les systèmes de transmission CPL et les services radio concernés par cette précaution. Ce n'est pas le cas pour d'autres technologies tel que le VDSL. L'organisme de standardisation ETSI en partenariat avec les leaders des technologies CPL et VDSL étudie la coexistence entre elles.

Des travaux récents [64] et [65] ont présenté l'impact du couplage par champ proche entre les lignes téléphoniques et électriques sur les performances d'une liaison VDSL. Ils montrent l'intérêt porté, soit par les organismes de standardisation, soit par les scientifiques, aux perturbations électromagnétiques générées par les systèmes CPL pouvant interférer avec des services en fonctionnement.

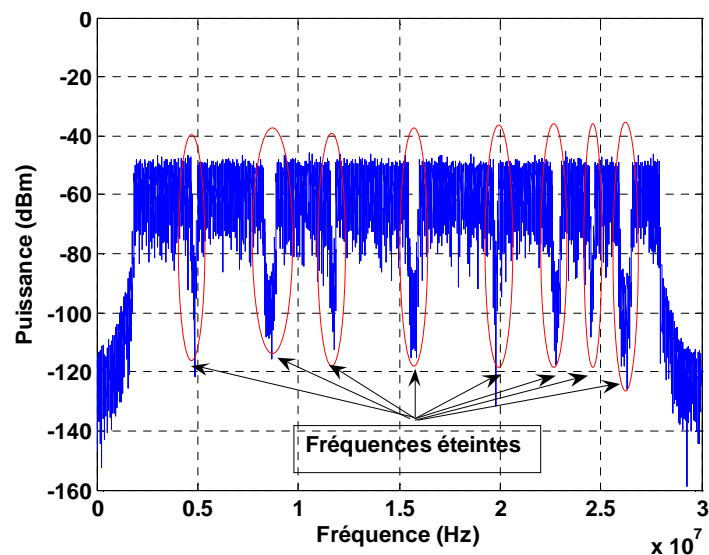


Figure 123. Spectre CPL

Ces perturbations ne sont pas produites seulement par les modems CPL mais plutôt par l'ensemble modem et réseau électrique. En effet, la topologie du réseau électrique domestique et l'impédance des appareils électroménagers alimentés par ce dernier, provoquent des désadaptations d'impédance assez fortes induisant des phénomènes multitrajets. Dès lors, le champ électromagnétique rayonné par le réseau électrique lors d'une transmission CPL est généré à la fois par les courants de mode différentiel et ceux de mode commun. Le rayonnement dû au mode différentiel est étroitement lié au facteur de réflexion en mode différentiel entre la phase et le neutre [66]. D'autres travaux [67] précisent que le champ magnétique est fortement lié au courant de mode différentiel et que son amplitude est essentiellement affectée par des discontinuités (à titre d'exemple, le raccordement des prises électriques). Les courants de mode commun sont provoqués principalement par la dissymétrie

du réseau électrique engendrée à la fois par la topologie du réseau et les appareils électriques domestiques. En effet, son amplitude est nettement inférieure à celle du courant de mode différentiel. Cependant, le champ électrique rayonné par le courant de mode commun peut être nettement supérieur à celui produit par les courants de mode différentiel. Dans [68] il a été montré que l'amplitude du champ électromagnétique ne dépend pas de la distance entre le point d'injection du signal et le point de mesure pour des fréquences inférieure à 10MHz. Parallèlement, il a été clairement montré que l'amplitude du champ électrique atteint des valeurs importantes dans la bande 150kHz-30MHz lors de l'extinction d'une lampe. Ce phénomène s'explique par la différence de longueur entre le fil de phase et le fil de neutre. Les fils électriques se comportent comme des antennes émettrices parfaitement adaptées à certaines fréquences dans la bande CPL. La connaissance du champ électromagnétique rayonné par le réseau électrique domestique représente un grand intérêt pour la communauté scientifique.

Des travaux de modélisation du réseau électrique vis à vis du champ électromagnétique rayonné lors d'une liaison CPL en utilisant des structures d'antenne canoniques (monopole, dipôle, boucle) et la méthode de calcul intégral ont été présentés dans la référence [69]. Cependant, la connaissance de la distribution du courant en fonction de la fréquence le long des fils électriques reste une tâche difficile. Les interférences électromagnétiques générées dans l'environnement domestique concerné par la transmission CPL restent à évaluer.

Cette partie aborde l'évaluation des champs électrique et magnétique rayonnés par un réseau simple puis complexe, lors d'une transmission CPL, par une approche purement expérimentale.

3.2 Configurations expérimentales de test

3.2.1 Chaîne de mesure du champ EM

La mesure du champ électromagnétique a été réalisée dans la bande 150kHz-200MHz. Cette bande a été divisée en deux sous-bandes, la première allant de 150kHz à 30MHz et la deuxième se situant entre 30MHz et 200MHz (voir Tableau 14). Dans la bande [150kHz, 30MHz], le champ électrique et le champ magnétique ont été mesurés séparément pour prendre en considération la problématique de la mesure du champ proche, les points de mesure étant positionnés à 1m ou à 3m des câbles électriques. L'amplitude de la tension aux

bornes des antennes a été mesurée à l’aide d’un analyseur de spectre. La configuration de l’analyseur est récapitulée dans le Tableau 15.

Tableau 14. Antennes utilisées

Antenne	Bande fréquentielle
Boucle	150kHz-30MHz
Monopole	150kHz-30MHz
Biconique	30MHz-200MHz

Tableau 15. Configuration de l’analyseur de spectre

RBW	10kHz
VBW	10kHz
Sweep Point	1001
Sweep Type	Linéaire
Scale	10dB/div
Detection mode	Pic positif
Impedance	50Ω
Attenuator	10dB
Format	Amplitude dBμV

Les antennes monopole et boucle sont des antennes actives placées sur un plan de masse et alimentées via une batterie afin d’éviter d’éventuelles perturbations véhiculées par le réseau électrique et surtout éviter les perturbations liées au rayonnement du câble d’alimentation. La liaison entre l’analyseur de spectre et les différentes antennes de mesure est réalisée à l’aide d’un câble coaxial de longueur égale à 3m et dont l’impédance est égale à 50Ω.

3.2.2 Topologie matérielle et logicielle de la chaîne de transmission CPL

Notre expérience consiste à utiliser un modem CPL afin de lire un flux vidéo issu d’une connexion ADSL. L’injection du signal CPL est réalisée à l’aide de deux modems CPL HPAV (débit physique égal à 200Mbps/s). Dans le cas des réseaux *Indoor*, les modems CPL sont souvent connectés au modem ADSL permettant ainsi le déport de cette connexion à n’importe quelle prise électrique dans l’habitat. A ce jour, quelques fournisseurs d’accès à

internet utilisent la solution CPL afin de déployer les trois services Vidéo-Données-VoIP dans l'habitat. A titre d'exemple le flux vidéo (flux prioritaire) est déporté de la sortie Ethernet du modem ADSL à la chambre où se trouve le décodeur vidéo, lui-même doté d'un modem CPL et branché à un écran de télévision pour la visualisation des vidéos.

Le modem ADSL est connecté à un DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplixer) en utilisant un câble téléphonique de catégorie 5 afin de pouvoir le synchroniser et simuler un fonctionnement réel de ce dispositif. Les vidéos sont enregistrées sur un serveur vidéo lui-même raccordé au DSLAM via une connexion Ethernet.

Dans le but de faciliter la configuration de la chaîne de transmission, le DSLAM a été configuré en mode Bridge (pont). Le service DHCP n'est donc pas assuré par le DSLAM mais plutôt par une application installée sur le serveur vidéo et nommée (FtnetIP). L'ensemble DSLAM, modem ADSL et serveur vidéo nous permet d'émuler une connexion à un serveur vidéo à distance en passant par le réseau internet. Par conséquent, les modems CPL fonctionneront dans des conditions réelles.

Le raccordement électrique des équipements utilisés est très important car il sera difficile de séparer leur contribution en termes de perturbations électromagnétiques générées sur le réseau électrique puis rayonnées. Nous avons donc alimenté l'ensemble DSLAM et serveur vidéo indépendamment du banc de test. Ces équipements ont été installés le plus loin possible du banc de test et du point de mesure pour ne pas influencer l'ensemble.

Au point d'accès A' considéré comme point d'émission, le modem ADSL (IAD : Internet Acces Device) et le modem CPL sont raccordés à une multiprise. Le flux vidéo est injecté sur le réseau au point A'.

Ce flux vidéo est récupéré par le second modem CPL connecté en B', point de réception. Il est décodé par une STB (Setup Box) qui fait office de décodeur vidéo. La STB est connectée au deuxième modem CPL récepteur via un câble Ethernet et raccordée à un écran de télévision de type LCD afin de pourvoir visualiser la vidéo (voir Figure 124).

Les mesures sont réalisées pour deux types de flux vidéo (flux SD et flux HD) afin de mettre les modems en condition réelle de fonctionnement tout en leur imposant un débit Ethernet variable selon le type de vidéo. Le flux SD nécessite un débit Ethernet égal à 4Mbits/s, le flux HD requiert un débit Ethernet égal à 11Mbits/s.

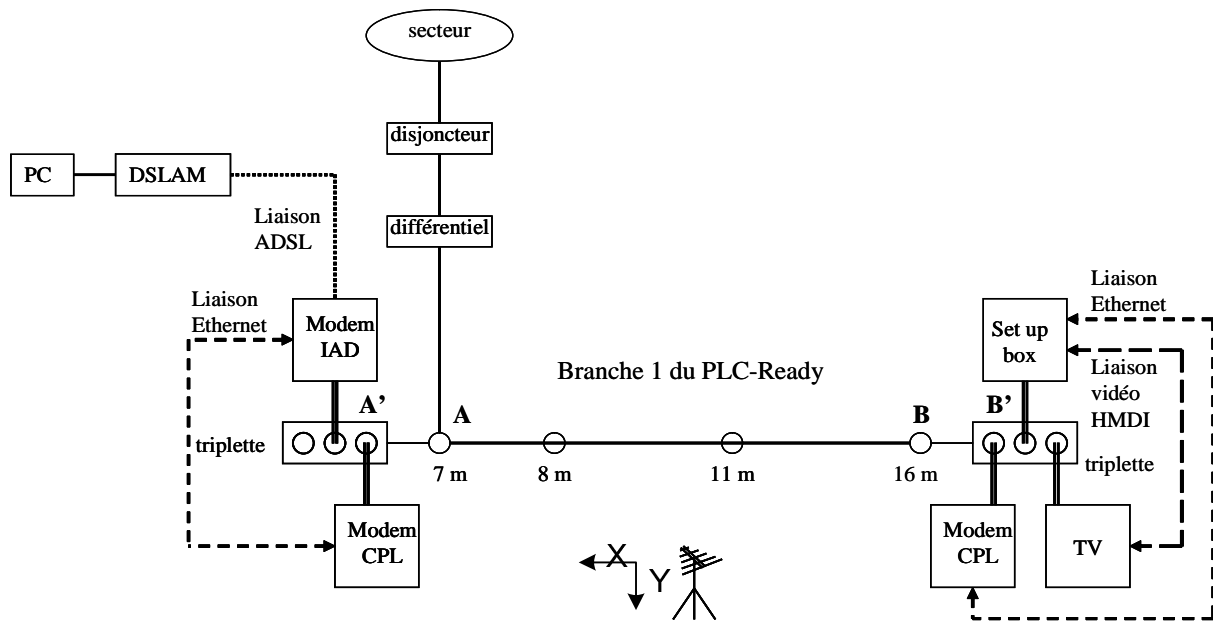


Figure 124. Topologie du banc de transmission CPL

3.2.3 Architecture du réseau électrique considéré et environnement de mesure

a) Réseau PLC READY

Les mesures ont été réalisées en premier lieu sur le banc PLC READY mis à notre disposition par le Laboratoire des Applications Numériques. L'émetteur et le récepteur sont respectivement branchés aux prises 7m et 16m de la première branche afin de réaliser une liaison directe (voir Figure 125).

La configuration de base est celle de la branche 1 du banc de test PLC READY mis en place au LAN. Ce dispositif a été présenté au chapitre 3. L'ensemble des dispositifs nécessaires à l'injection du flux CPL (modems IAD et CPL) sont raccordés à une même multiprise connectée à la prise à 7m de la branche 1 du banc de test. L'ensemble des dispositifs nécessaires à la réception (Setup Box, écran de TV-LCD et le deuxième modem CPL) sont branchés à une multiprise raccordée à la prise 16m de cette même première branche.

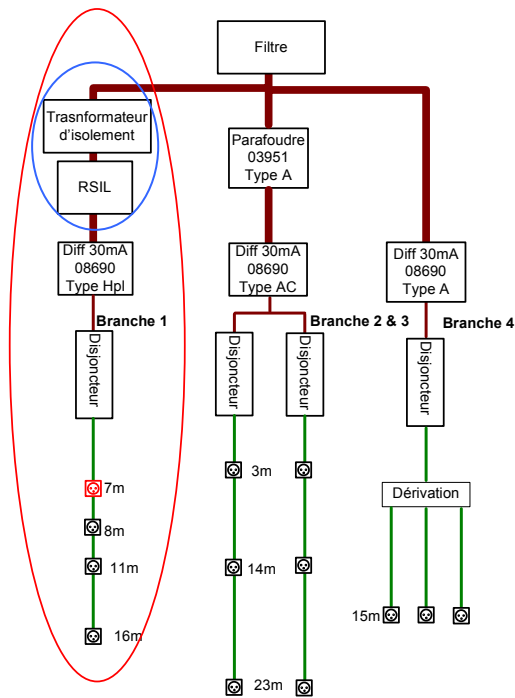


Figure 125. Banc de test PLC READY

Le banc PLC READY a été légèrement modifié en insérant un transformateur d'isolement et un RSIL entre le filtre principal du banc et le disjoncteur de la première branche du banc afin de permettre la reproductibilité de la mesure en dehors de ce banc de test (voir Figure 125).

Comme décrit dans le chapitre 3, la structure du banc PLC READY utilise trois types de câbles de technologies différentes (RO2V, ICT et Écranté). Rappelons que les résultats obtenus montrent que les câbles ICT et RO2V présentent un comportement presque similaire en termes d'impédance et de pertes d'insertion. Par conséquent, pour les tests en rayonnement, nous avons choisi de n'utiliser que le câble RO2V et le câble écranté. La comparaison des résultats de mesure nous permettra d'évaluer les différences de comportement de ces deux derniers câbles du point de vue du rayonnement électromagnétique lors d'une transmission CPL.

La majorité des câbles électriques sont étalés dans le faux plafond ou dans le plancher technique. Les tronçons comportant les prises de courant sont placés dans des goulottes fixées verticalement sur un pan de mur. Le schéma de l'installation est fourni par la Figure 126.

Ce banc de test installé au LAN est inamovible. Il est donc impossible de le déplacer pour pratiquer les mêmes mesures en chambre anéchoïque afin d'évaluer le rayonnement dans l'espace libre et sans perturbation. Parallèlement, des contraintes géométriques dues à la

présence d'une paillasse à moins de 3m du banc, perturbent la propagation des ondes émises par le réseau électrique et rendent la mesure du champ EM à 3m impossible. Pour remédier à ces problèmes, le câblage de la première branche du banc de test a été dupliqué.

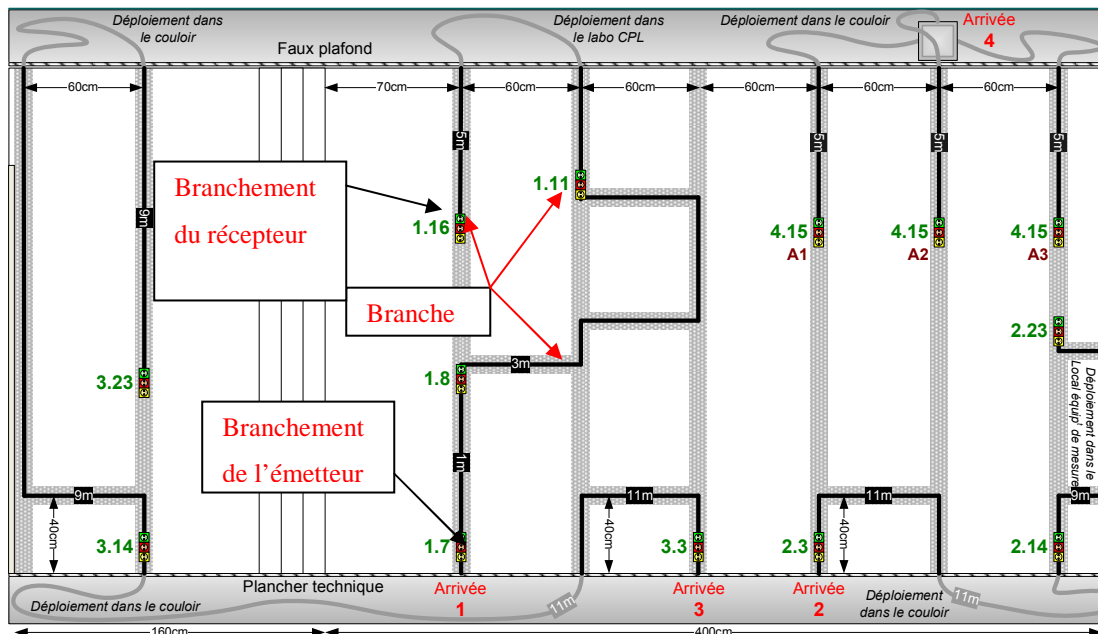


Figure 126. Banc de test PLC READY (document LAN)

b) Réseau amovible

Le câblage de la première branche du banc de test a été réalisé de façon amovible avec les mêmes types de câble (RO2V et écranté) afin de pouvoir le transporter dans une chambre anéchoïque dont les dimensions sont limitées, et donc assez contraignantes par rapport à celles du schéma de câblage initial. Par conséquent, nous avons dû procéder à un changement de la géométrie du câblage.

La structure de la branche 1 a été reproduite du différentiel jusqu'aux quatre prises de courant. Le schéma de câblage ainsi que le raccordement des différents équipements électriques utilisés durant la campagne de mesure sont représentés sur la Figure 127. Contrairement au banc PLC READY, le câble électrique est fixé à une structure en bois dont la forme est rectangulaire de dimension 6m×1,2m. Ainsi le câble forme une boucle rectangulaire. La distance entre le sol et le câble est de 40cm. Le modem CPL émetteur et le modem ADSL sont branchés à la prise à 7m via une multiprise. De la même façon, le modem CPL récepteur, l'écran TV-LCD et la STB sont raccordés à la prise à 16m. Dans le but de stabiliser l'impédance du réseau électrique et de filtrer les perturbations conduites issues du point d'alimentation, le réseau électrique est précédé par un disjoncteur, un différentiel, un

RSIL, un filtre passe bas monophasé et un transformateur d'isolement. Ce réseau amovible est utilisé pour une campagne de test en espace libre et une seconde en chambre anéchoïque.

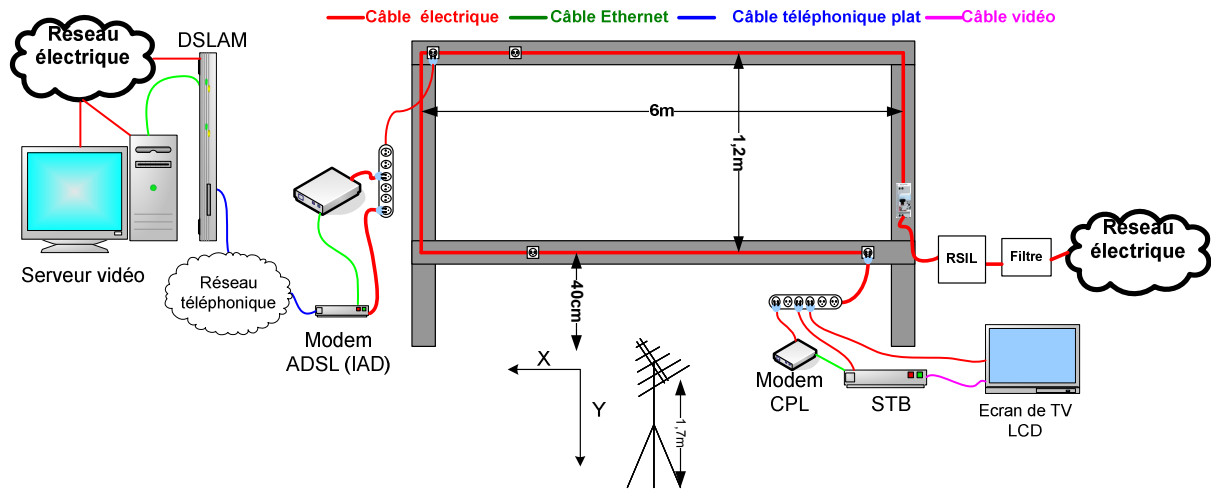


Figure 127. Description du banc de test amovible

La chambre anéchoïque utilisée possède des parois recouvertes de ferrites de façon à reproduire les conditions de propagation les plus proches de l'espace libre dans la bande étudiée 10kHz-1GHz. La disposition du banc de test installé dans la chambre est représentée sur la Figure 128.

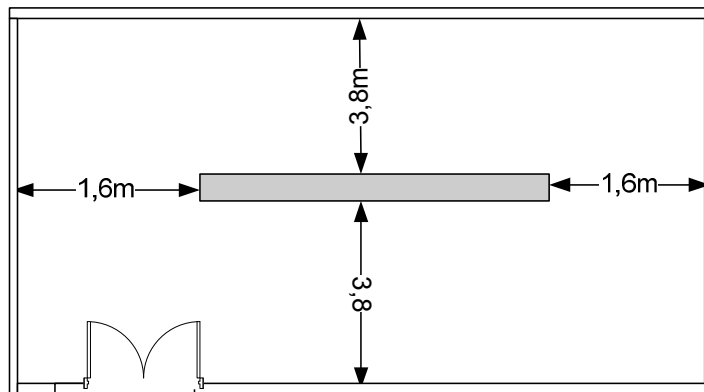


Figure 128. Disposition du banc de test dans la chambre

3.3 Modélisation de la configuration expérimentale de test

3.3.1 Prise en compte du réseau électrique et des éléments connectés

Dans l'optique de déterminer la fonction de transfert du réseau électrique qui pourra être considérée comme vue par les modems CPL (entre les points A' et B'), nous avons modélisé le réseau en utilisant l'approche circuit (SPICE) où les paramètres primaires sont modélisés à l'aide de polynômes. Pour cela, l'impédance de chaque appareil raccordé au

réseau électrique est évaluée par une approche expérimentale selon la méthode précédemment décrite (cf. 2.5.1). Les dispositifs caractérisés en fonctionnement sont :

- l'écran TV,
- l'alimentation du modem ADSL (IAD),
- la Setup Box,
- le réseau électrique vu du point A, pour prendre en considération le réseau électrique en amont du point d'injection (câble, différentiel, disjoncteur et RSIL).

La Figure 129 représente le module et la phase de l'impédance des appareils électriques cités ci-dessus.

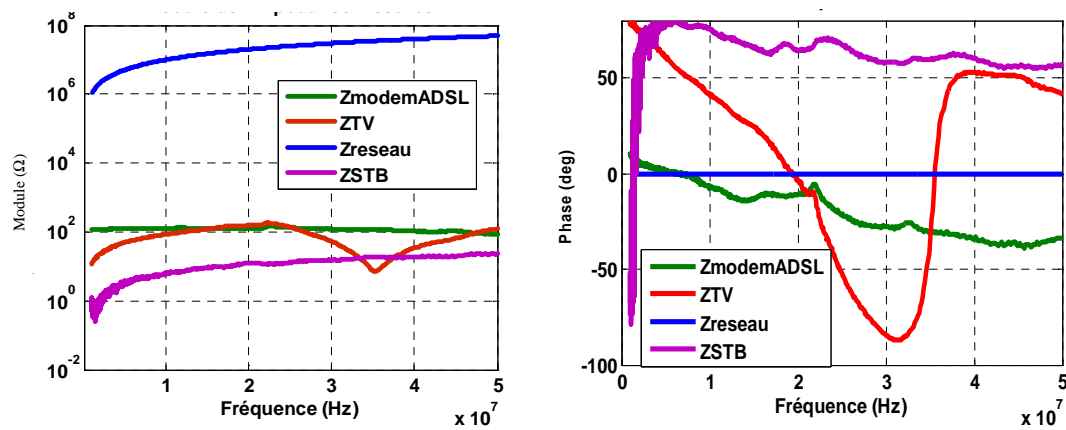


Figure 129. Module et phase de l'impédance des appareils électriques domestiques branchés au banc de test

Ces résultats sont par la suite intégrés au simulateur SPICE en utilisant des scripts spécifiques aux simulateurs SPICE sous forme (module, phase) ou (partie réelle, partie imaginaire).

Le câble électrique de type RO2V utilisé durant cette campagne de test est modélisé à l'aide de plusieurs quadripôles en T en cascade, dont chacun représentant 25cm de longueur. L'approche est détaillée dans le chapitre 2 (cf. 4.5).

Les modems CPL et les appareils domestiques ne sont pas branchés en un point unique mais sur plusieurs prises de courant adjacentes constituant la barrette de la multiprise. Ces points de connexion sont différents (voir Figure 130). La longueur de la multiprise est égale à 2m (cordon plus barrette). Il est donc nécessaire de modéliser la multiprise par des éléments électriques (R, L, C et G) pour maîtriser et reproduire son comportement fréquentiel en vu de l'intégrer au simulateur SPICE.

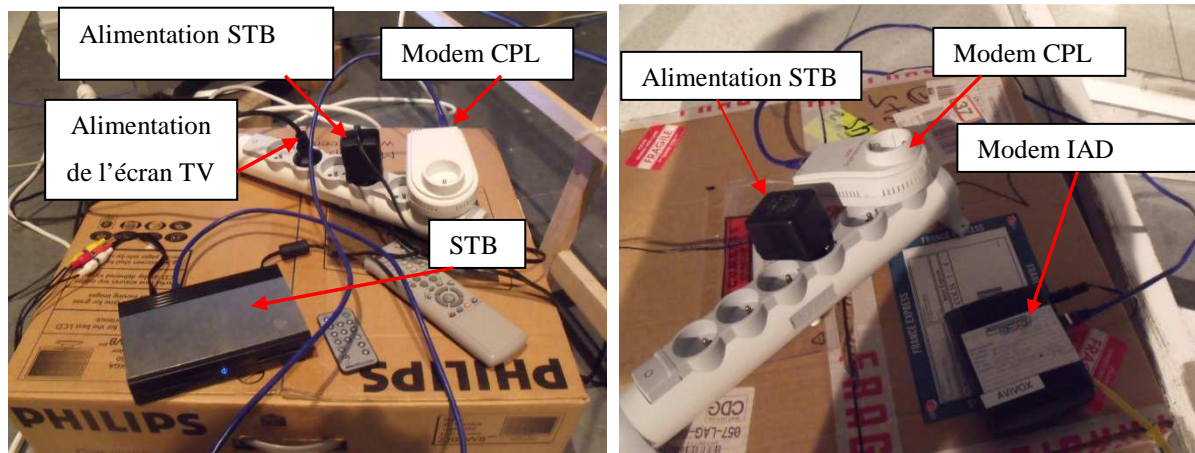


Figure 130. Branchement des appareils électriques

3.3.2 Modélisation de la multiprise

La multiprise peut se décomposer en deux parties. La première partie est un cordon électrique souple composé de trois fils (phase, neutre et terre) dont la section est égale à $2,5\text{mm}^2$ et de longueur 1,6m. La deuxième partie est une barrette de plusieurs prises auxquelles sont branchés les équipements électriques. La connexion entre les prises est assurée par deux barres minces parallèles, espacées de 5cm et fixées à l'intérieur du socle en plastique de la multiprise. L'une d'elles est connectée à la phase, l'autre est reliée au neutre, permettant ainsi d'alimenter les équipements électriques. L'effet de la barrette de terre est négligé (voir Figure 133).

a) Modélisation du cordon

En utilisant l'approche SPICE polynomiale proposée dans le chapitre 2 (cf. 4.5) le câble peut être décomposé en 6 cellules de 25cm. Chaque cellule est modélisée avec un quadripôle en T constitué de quatre éléments électriques R, L, C et G. La variation fréquentielle de chaque paramètre est déduite de la mesure des paramètres S. La Figure 131 montre les résultats de mesure des paramètres de transmission S_{21} et de réflexion S_{11} du cordon. Nous supposons que la matrice S du cordon est symétrique ($S_{21}=S_{12}$ et $S_{11}=S_{22}$).

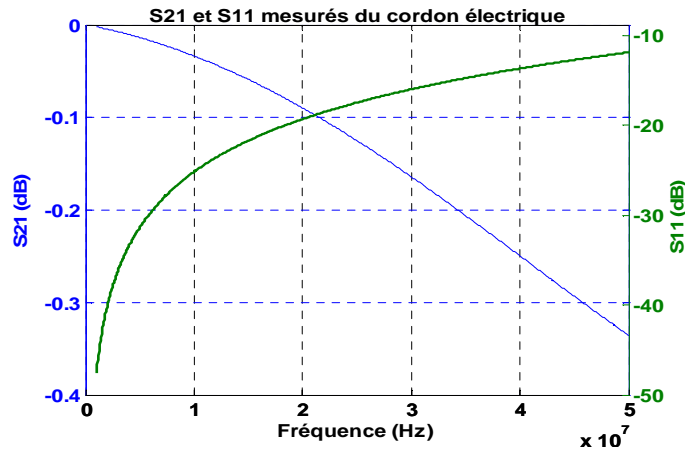


Figure 131. Paramètres S mesurés du cordon électrique

La Figure 132 représente la variation des paramètres R, L, C et G en fonction de la fréquence pour une cellule représentative de 25cm du cordon électrique de la multiprise. Chaque paramètre est par la suite exprimé en fonction de la fréquence sous une forme polynomiale (voir l'Équation 77, l'Équation 78, l'Équation 79 et l'Équation 80).

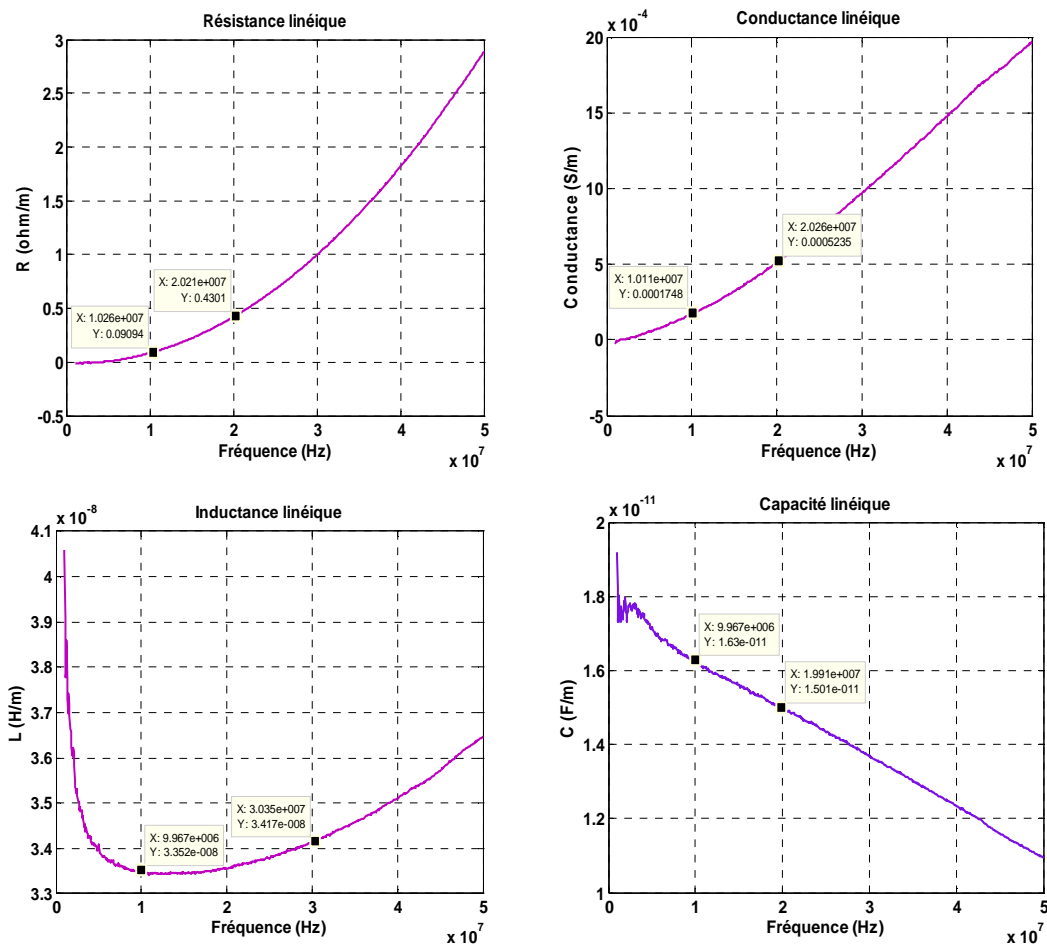


Figure 132. Paramètres R, L, C et G du modèle cordon électrique

$$R(f) = 1,22 \cdot 10^{-15} \cdot f^2 - 3,11 \cdot 10^{-9} \cdot f + 5,92 \cdot 10^{-3} \quad \text{Équation 77}$$

$$L(f) = -1,23 \cdot 10^{-31} \cdot f^3 + 1,31 \cdot 10^{-23} \cdot f^2 - 3,42 \cdot 10^{-16} \cdot f + 3,59 \cdot 10^{-8} \quad \text{Équation 78}$$

$$C(f) = -1,35 \cdot 10^{-19} \cdot f + 1,77 \cdot 10^{-11} \quad \text{Équation 79}$$

$$G(f) = -10^{-26} \cdot f^3 + 1,15 \cdot 10^{-18} \cdot f^2 + 7,23 \cdot 10^{-12} \cdot f + 1,26 \cdot 10^{-5} \quad \text{Équation 80}$$

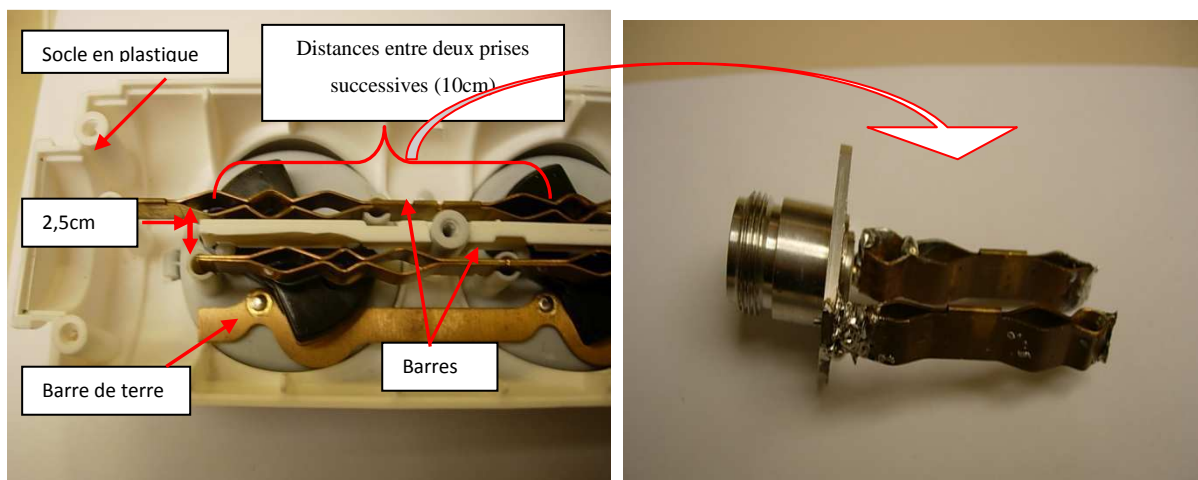


Figure 133. Composition interne de la multiprise simple

b) Modélisation de la barrette

Pour modéliser la deuxième partie de la multiprise, nous avons considéré une longueur élémentaire des deux barres parallèles (10cm), séparant deux prises successives de la multiprise (voir Figure 133). Sur celle-ci, nous avons effectué des mesures d'impédance en circuit-ouvert et en court-circuit. Ainsi nous pouvons jouer sur le nombre de prises constituant une barrette pour l'adapter selon le type de multiprise et prendre en considération l'effet global de la multiprise sur la réponse fréquentielle du réseau électrique. La longueur élémentaire des deux barres est aussi modélisée par un quadripôle en T dont les paramètres R et G sont supposés nuls car les pertes diélectriques de l'air entre les deux barres et les pertes Joule dans la structure métallique sont très faibles (et difficiles à évaluer). Par conséquent chaque cellule est modélisée par deux inductances et une capacité linéique. Regardons les résultats obtenus en appliquant cette démarche. La Figure 134 montre tout d'abord les résultats des impédances mesurées en court-circuit et circuit-ouvert, effectuées sur les deux barres.

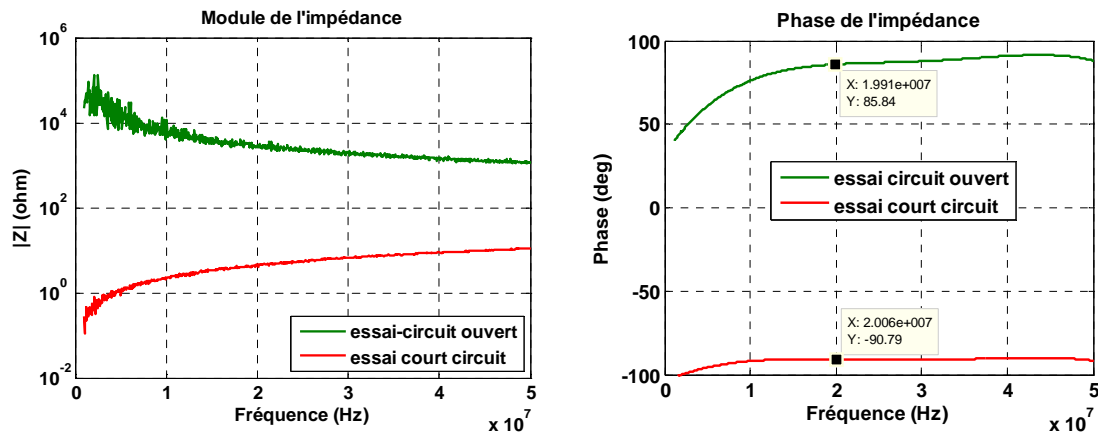


Figure 134. Impédances en court-circuit et circuit-ouvert des deux barres

De ces résultats sont extraits la capacité et l'inductance linéiques en fonction de la fréquence pour la longueur élémentaire de deux barres parallèles (voir la Figure 135). Nous observons une fluctuation importante des deux courbes dans la bande [1MHz, 4MHz]. Elle est due à l'imperfection des mesures réalisées avec l'analyseur de réseau. Il est difficile d'expliquer ce phénomène. Plusieurs hypothèses sont à considérer (méthode de calibration, connectique N ou soudures). Nous remarquons que l'inductance et la capacité linéiques sont faibles et varient peu en fonction de la fréquence. Pour simplifier le modèle, nous supposons que C et L sont constantes en fonction de la fréquence et valent respectivement 17,72nH/m et 2,65pF/m.

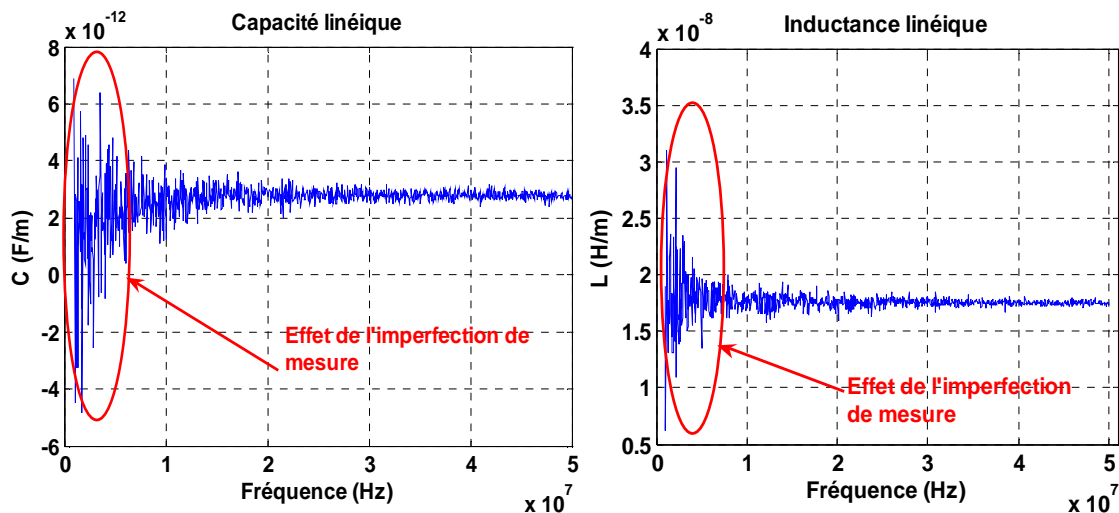


Figure 135. La variation de C et de L en fonction de la fréquence

La barrette de cinq prises peut ainsi être modélisée par quatre quadripôles (voir Figure 136). La Figure 137 permet de comparer l'impédance mesurée et celle simulée. Nous constatons que les deux courbes sont superposées. Nous pouvons en conclure que le modèle quadripôle en T est valide dans la bande [1MHz, 50MHz].

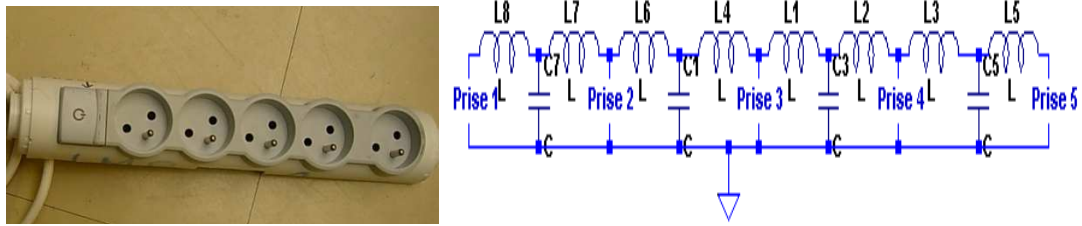


Figure 136. Validation du modèle circuit des deux barres parallèles

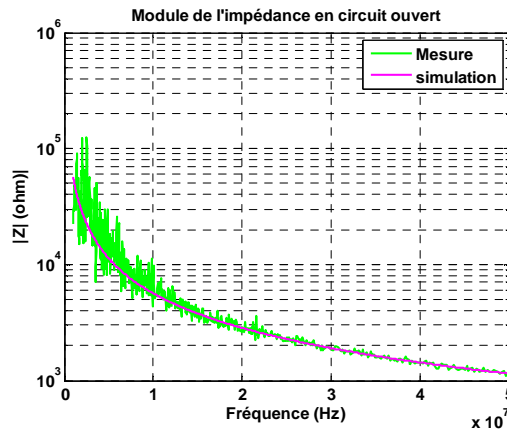


Figure 137. Modèle électrique de la barrette de la multiprise

Le modèle global de la multiprise est constitué de 11 quadripôles en T, 7 pour le cordon (chacun composé de quatre composants $R(f)$, $L(f)$, $C(f)$ et $G(f)$ variables en fonction de la fréquence) et 4 pour les prises électriques (chacun constitué de deux composants L et C fixes en fonction de la fréquence). L'impact de la liaison de terre est ignoré. De plus la discontinuité d'impédance provoquée par l'interrupteur n'est pas prise en compte dans ce modèle.

3.3.3 Simulation du réseau électrique testé

L'ensemble du système : le réseau électrique avec le modèle du câble RO2V, la multiprise, l'impédance d'entrée mesurée de chaque équipement électrique (communicant et non communicant), a été simulé. Le schéma électrique global de simulation du réseau électrique est donné Figure 138.

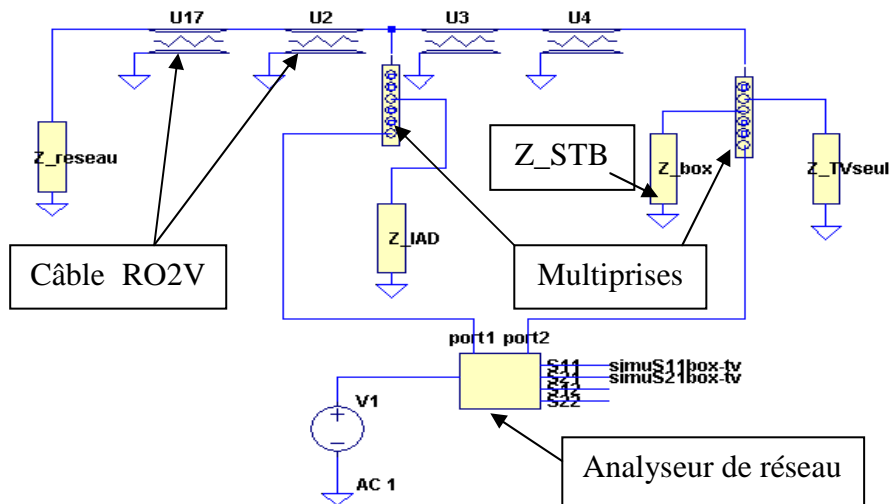


Figure 138. Modèle électrique du réseau testé

La fonction de transfert est simulée entre les prises d'extrémité de chacune des multiprises, points auxquels les modems CPL sont par la suite connectés lors des mesures. L'analyseur de réseau joue simultanément le rôle du modem émetteur et du récepteur avec une impédance de référence égale à 50Ω . Afin de pouvoir confronter le résultat de simulation au résultat de mesure, nous avons mesuré la fonction de transfert suivant le protocole précédemment décrit (cf 3.2.2). La comparaison entre la mesure et la simulation est représentée sur la Figure 139. Les résultats de la simulation et de la mesure sont très proches en termes de module comme de phase. Cependant nous observons un écart d'amplitude de 5dB à 22MHz et un décalage fréquentiel de l'évanouissement spectral, observé à 33MHz sur la courbe de la mesure et à 36,81MHz sur la courbe de simulation. Nous pouvons remarquer un écart de phase de presque 70 degrés autour de 34MHz et de quelques degrés pour les autres fréquences. Dans l'ensemble, les résultats de simulation et de mesure ont la même tendance. Le modèle reproduit de façon assez fidèle le comportement fréquentiel du réseau électrique.

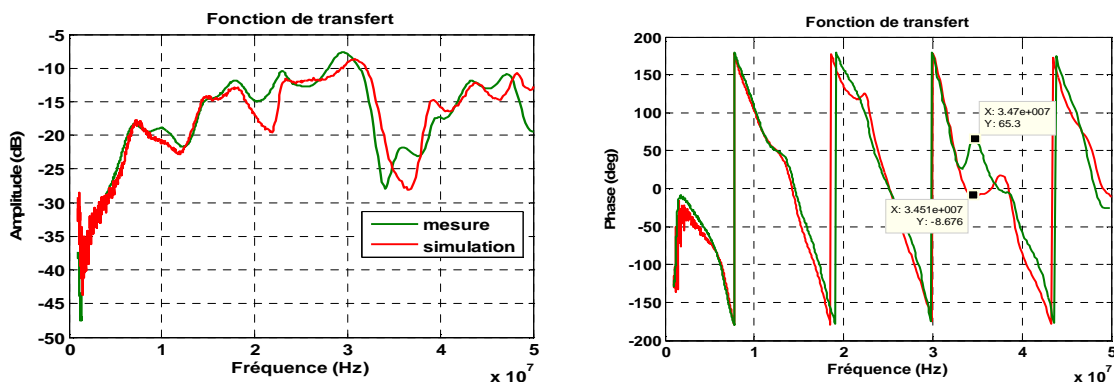


Figure 139. Fonctions de transfert simulée et mesurée

La Figure 140 représente la fonction de probabilité cumulative (FPC) de l'écart relatif entre la simulation et la mesure du module. Cet écart est calculé en utilisant l'Équation 81. Nous constatons que cette erreur relative n'excède pas les 10% à 74% de probabilité et reste inférieure à 24% avec une probabilité de 90% sur toute la bande fréquentielle étudiée. Cela confirme la validité du modèle SPICE employé.

$$\text{écart}(\%) = \left| \frac{S_{21}^{\text{mesure}} - S_{21}^{\text{simulation}}}{S_{21}^{\text{simulation}}} \right| \cdot 100 \quad \text{Équation 81}$$

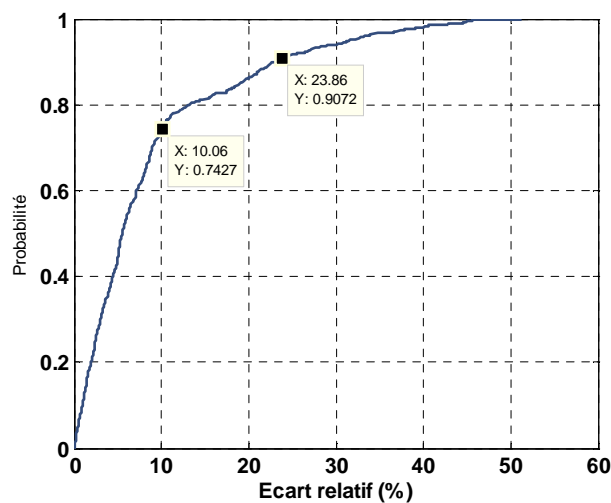


Figure 140. FCP de l'erreur relative entre la mesure et la simulation

Le rayonnement électromagnétique issu du réseau électrique modélisé, lors d'une transmission CPL fera l'objet de la suite de notre étude.

3.4 Champ EM rayonné par une transmission CPL

Les mesures du champ EM rayonné ont été réalisées en trois lieux différents, au sein du LAN, en extérieur et en chambre anéchoïque pour deux types de câbles (RO2V et écrané), dans la bande de fréquences 10kHz-1GHz. Cependant, nous limiterons notre propos à la bande 150kHz-1GHz et nous nous intéresserons plus particulièrement à la bande 150kHz-200MHz.

3.4.1 Démarche

Sur chaque site de mesure, nous avons tout d'abord procédé à la mesure du champ électromagnétique lorsque toutes les sources étaient éteintes (secteur, CPL, appareils nécessaires à la transmission ou à la visualisation des images). Ces mesures constituent le

champ EM de référence. Ce dernier dépendra du site de mesure et de l'environnement EM global de celui-ci.

Dans une seconde étape de mesure, le circuit électrique est mis sous tension et les appareils électriques non communicants mais nécessaires à la transmission ou à la visualisation sont branchés (Téléviseur, modem IAD, Setup Box). Nous pouvons évaluer ainsi le champ EM ambiant créé par notre réseau électrique sans flux.

Dans une dernière étape, les liaisons ADSL et CPL sont établies et le flux vidéo SD ou HD est transmis du modem CPL émetteur au modem CPL récepteur. Le signal CPL est injecté sur le réseau électrique. Cette configuration nous permet de mesurer le champ EM. En le comparant aux précédentes mesures, nous pourrions évaluer la contribution de la transmission CPL sur le champ rayonné mesuré. Les résultats de ces différentes étapes sont présentés dans les paragraphes suivants en respectant cette progressivité.

3.4.2 Champ EM de référence

Nous avons procédé à une mesure du champ EM ambiant à un 1 m du banc de test avant la mise en marche de l'ensemble de dispositif (Modems CPL, IAD, DSLAM, écran de TV et la STB) afin de pouvoir identifier les sources de rayonnement externes. Les résultats obtenus pour les champs E et H sont respectivement représentés sur la Figure 141 et la Figure 142. Nous pouvons noter que le champ électrique ambiant mesuré dans chaque environnement est relativement faible. Son amplitude est maximale à 800kHz et vaut 100dB μ V/m. Elle est comprise entre 30dB μ V/m et 60dB μ V/m sur la bande CPL [10MHz, 30MHz]. Le champ magnétique présente une amplitude maximale inférieure à 40dB μ A/m à 560kHz pour les trois cas représentés. Une amplitude importante est observée sur quelques fréquences. Cela est dû aux rayonnements magnétiques de sources externes.

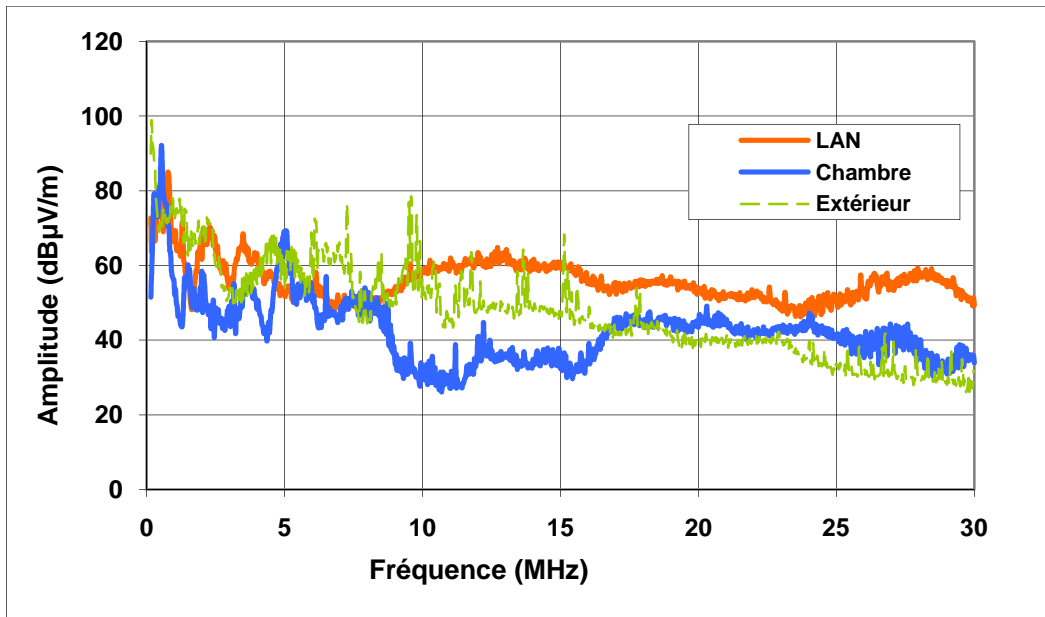


Figure 141. Champ électrique de référence entre 150kHz et 30MHz

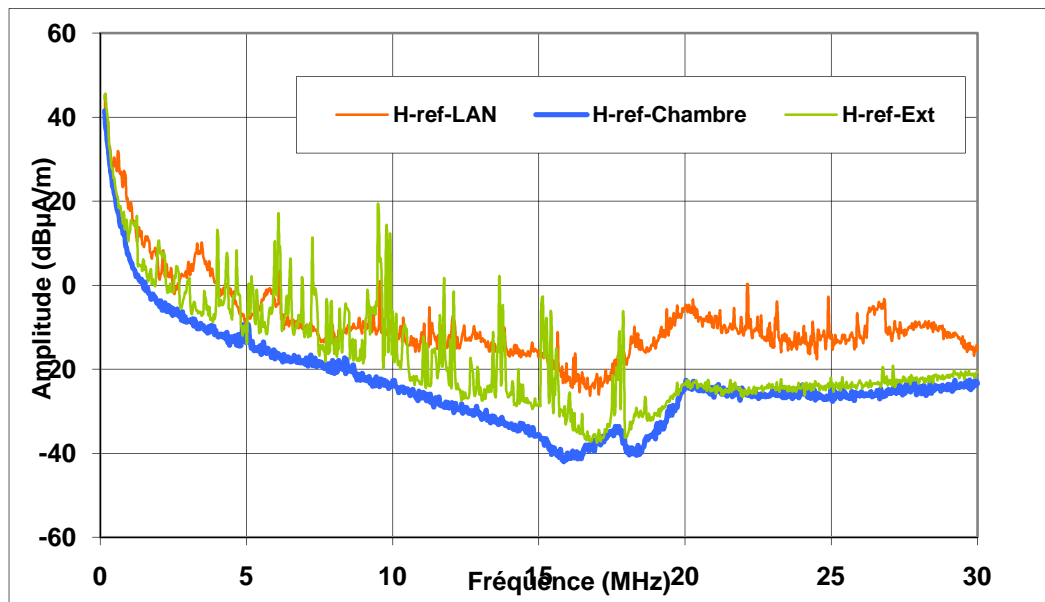


Figure 142. Champ magnétique de référence entre 150kHz et 30MHz

La Figure 143 et la Figure 144 montrent le champ électrique de référence respectivement dans la bande 30MHz-200MHz et 200MHz-1GHz. Nous pouvons observer l'apparition des porteuses utilisées par les services radio : la bande FM (87,7MHz-102,7MHz), le téléphone mobile (entre 900MHz et 960MHz), la télévision terrestre numérique (TNT) et analogique dont la largeur des canaux est égale à 8MHz dans la bande UHF (470MHz-880MHz). A titre d'exemple nous pouvons facilement identifier le canal 51 du service TNT dont la fréquence centrale est égale à 714MHz.

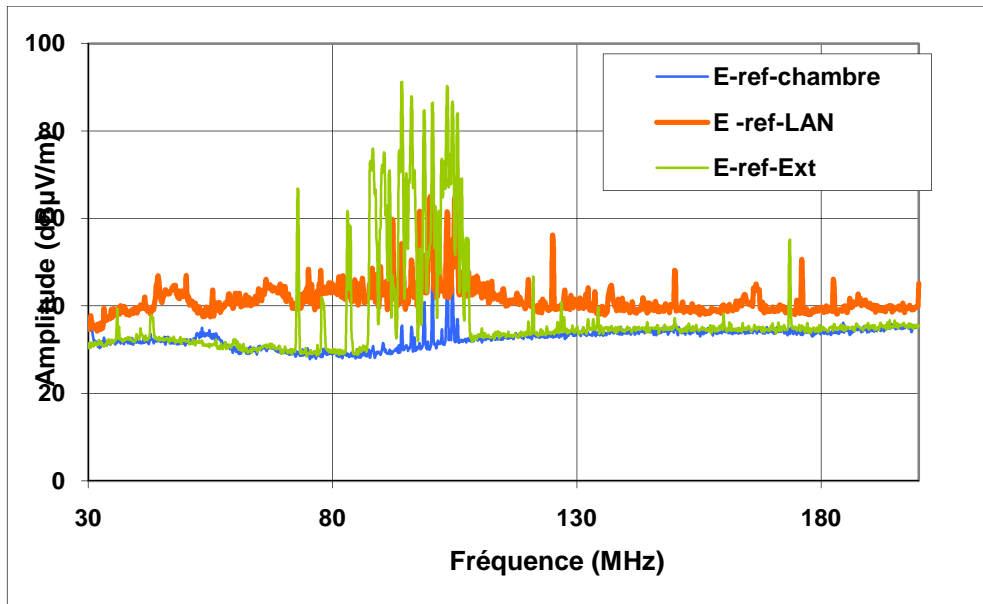


Figure 143. Champ électrique de référence dans la bande 30MHz-200MHz

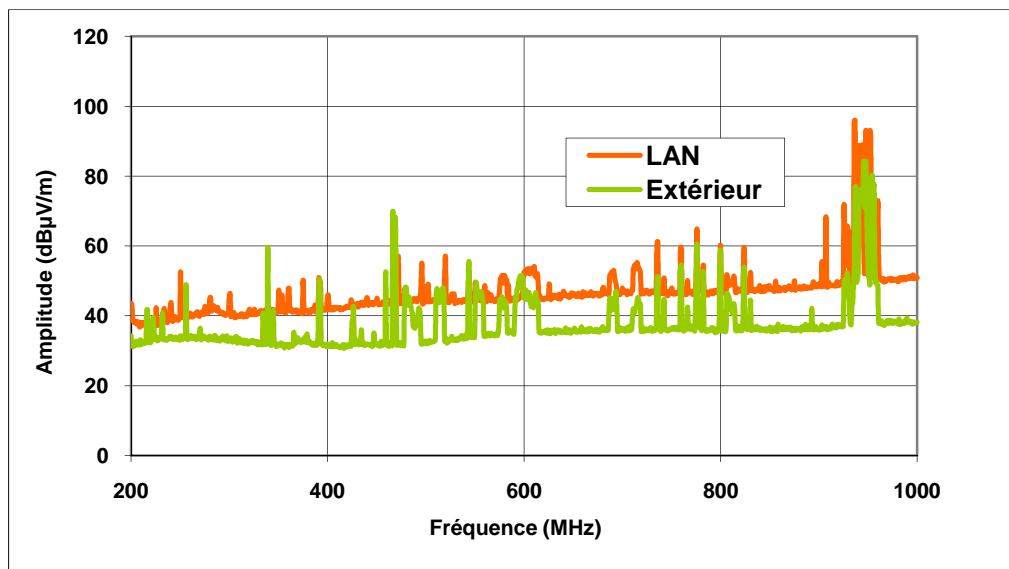


Figure 144. Champ électrique de référence dans la bande 200MHz-1GHz

3.4.3 Champ EM ambient sans flux CPL

Dans l'objectif d'estimer les interférences générées par les appareils électriques branchés au banc de test, nous avons réalisé une deuxième étape de mesure du champ électromagnétique rayonné. Seuls sont en route les équipements sans flux CPL. Pour mieux observer l'apport de ces sources externes potentielles en terme de champ électromagnétique dans la bande 150kHz-30MHz puis dans la bande 30MHz-200MHz, nous avons calculé l'écart d'amplitude des champs E et H avant et après la mise en marche du banc de test. Les résultats obtenus dans la bande 150kHz-30MHz pour les trois milieux (chambre anéchoïque, LAN et extérieur) sont représentés sur la Figure 145 pour le champ E et sur la Figure 146

pour le champ H. Nous constatons un écart de 15dB maximum pour les mesures réalisées en chambre anéchoïque et au laboratoire pour ces deux champs. Cette différence montre que l'ensemble du réseau électrique et des appareils électriques domestiques ont une influence sur l'environnement EM du site de test. Par ailleurs, nous pouvons noter un écart important dont l'amplitude maximale est presque égale à 30dB pour le champ E et à 35dB pour le champ H, lorsque les mesures sont faites à l'extérieur. Ces fortes fluctuations sont ponctuelles. Il est difficile de donner une explication à cette observation si ce n'est que nous n'avons pas la maîtrise des sources électromagnétiques environnantes. Nous n'avons pas observé un tel écart d'amplitude dans un environnement maîtrisé. Nous supposons que cette différence est principalement provoquée par le champ électromagnétique rayonné par des sources externes non connues, plus ou moins proches du dispositif de mesure.

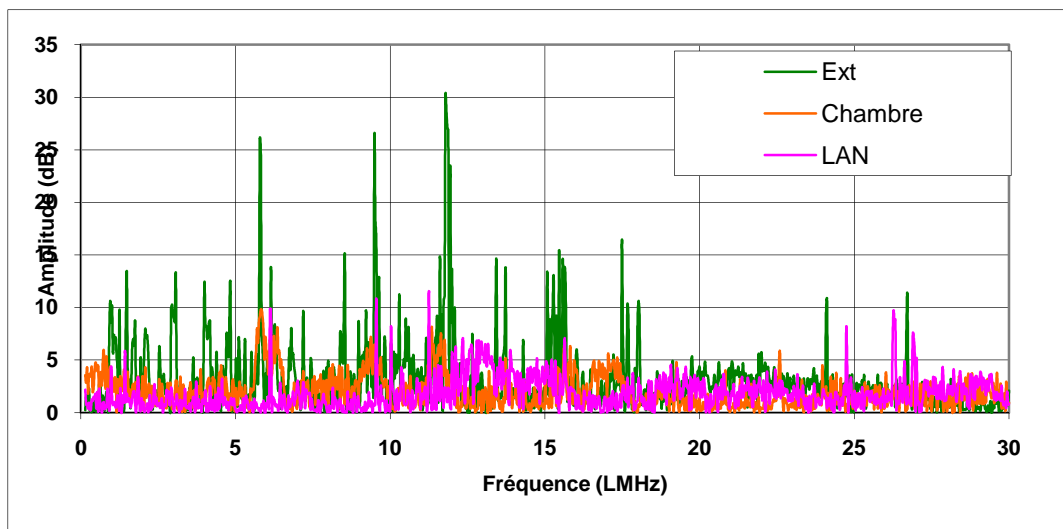


Figure 145. Écart entre le champ E de référence et celui rayonné par les appareils électriques

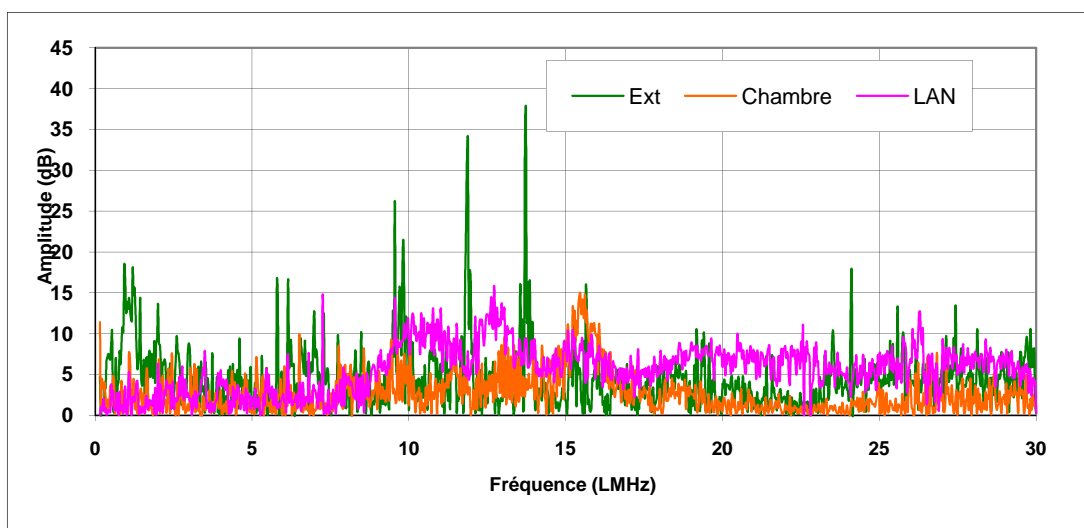


Figure 146. Écart entre le champ H de référence et celui rayonné par les appareils électriques

La Figure 147 montre le même type de mesure pour la bande 30MHz-200MHz et pour les trois sites. Nous pouvons noter un écart très faible et en moyenne égal à 1,5 dB pour les mesures réalisées au LAN. Quant aux tests menés en chambre anéchoïque, l'écart est plus important et égal à 10dB autour de 35MHz, inférieur à 14dB autour de 60MHz et dans la bande FM. Cette différence n'est pas une image directe du champ rayonné par les appareils électriques. Elle est liée aussi aux champs existants à l'extérieur de la chambre. Ceux-ci sont captés et véhiculés par les câbles "ADSL" qui relient les appareils communicants placés à l'intérieur de la chambre au serveur situé à l'extérieur de celle-ci. Par ailleurs, nous constatons le même écart pour les mesures réalisées en extérieur par rapport à la bande FM et un écart maximal inférieur à 15dB sur quelques fréquences.

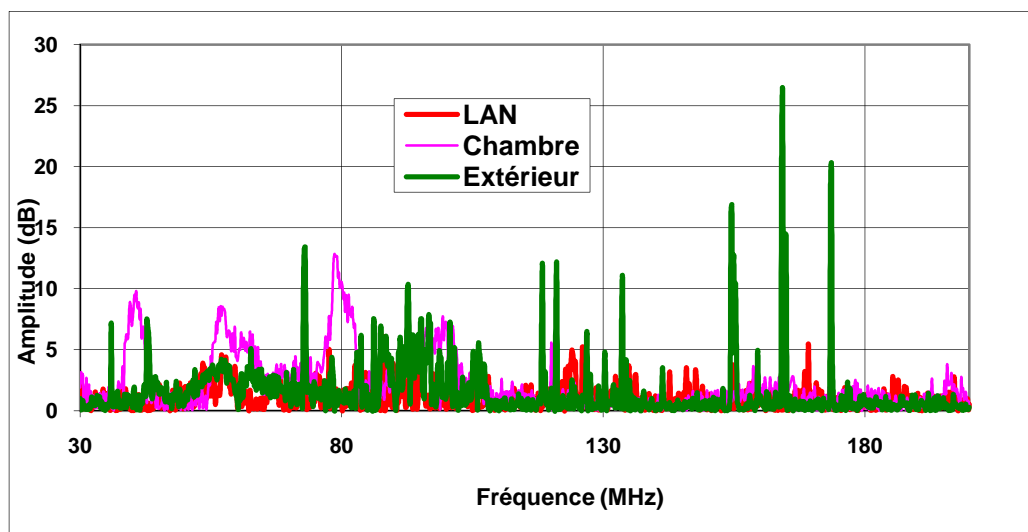


Figure 147. Écart entre le champ E de référence et celui rayonné par les appareils électriques 30MHz-200MHz

Nous concluons que le réseau électrique et les appareils électriques domestiques utilisés pour cette campagne de mesure rayonnent un champ électromagnétique faible dans la bande 150kHz-200MHz. Le spectre des perturbations reste très étroit en comparaison avec le spectre CPL plutôt large bande s'étalant entre 1,8MHz et 30MHz. Voyons maintenant l'effet d'un flux CPL sur le champ EM émis.

3.4.4 Champ EM mesuré avec flux CPL

Les rayonnements EM observés alors que des flux de données circulent sur le réseau électrique vont être présentés de façon progressive. Nous allons tout d'abord comparer les spectres des champs électromagnétiques observés à ceux des courants circulant sur les câbles. Ensuite, compte tenu de la diversité des structures utilisées (deux topologies, deux types de

câbles) et des types de flux considérés (SD et HD), nous présenterons la contribution de chacun d'eux. Enfin nous rappelons en quoi consiste le taux de conversion de mode, son principe de mesure et nous essaierons de le corrélérer au champ électromagnétique rayonné.

a) Courants de mode commun et de mode différentiel et rayonnement du réseau électrique

La transmission consiste à déployer un flux vidéo de la prise à 7m à la prise à 16m où sont branchés le décodeur vidéo (STB) et le téléviseur. Les perturbations électromagnétiques sont mesurées pour deux types de flux vidéo (SD et HD) pour les deux types de câble électrique (RO2V et écranté) et dans les trois milieux de test (PLC READY-LAN, extérieur et chambre anéchoïque). La différence principale entre ces deux types de flux réside principalement dans la qualité vidéo et le débit nécessaire pour une bonne transmission qui doit être égale à 4Mbits/s pour le SD et 11Mbits/s pour le HD.

Dans le but de quantifier le rayonnement électromagnétique lors d'une transmission CPL, nous avons comparé les champs mesurés à 1m du réseau électrique lors d'une transmission CPL (vidéo HD) aux champs E et H de référence. Les résultats sont représentés sur la Figure 148 et la Figure 149 dans la bande 150kHz-30MHz.

Sur ces courbes, nous pouvons facilement distinguer le spectre CPL caractérisé par ses trous spectraux correspondant aux bandes radioamateur. L'amplitude minimale est égale à 40dB μ V/m pour le champ E et -30dB μ A/m pour le champ H. Les amplitudes maximales sont observées à 13MHz et égales à 70dB μ V/m pour le champ E et 43dB μ A/m pour le champ H. Nous remarquons que le champ magnétique rayonné pendant la transmission CPL est supérieur au champ de référence dans la bande 150kHz-30MHz, et principalement dans la bande 10MHz-25MHz, avec deux maxima l'un à 14MHz et 20MHz dont l'amplitude est égale à 20dB μ A/m.

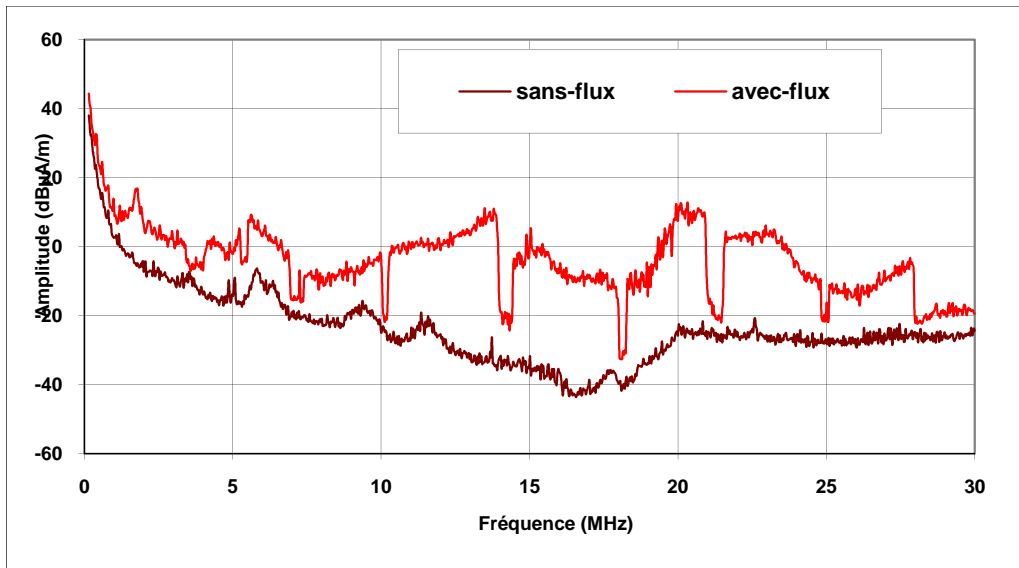


Figure 148. Mesure du champ H en chambre anéchoïque - bande [150kHz, 30MHz]

Pour le champ E mesuré en présence du flux CPL, le résultat est identique à la courbe de référence dans la bande 150kHz-8MHz. Nous en déduisons que le champ électromagnétique rayonné par le signal CPL n'est visible qu'à partir de 8MHz. Au-delà, son amplitude a presque la même allure que celle du champ magnétique avec des maxima observés aux mêmes fréquences que cité ci-dessus. Nous verrons par la suite l'impact du changement de la géométrie sur le spectre CPL rayonné. On se limite dans un premier temps à l'analyse des mesures réalisées en chambre anéchoïque afin de ne pas prendre en compte les perturbations issues des sources externes.

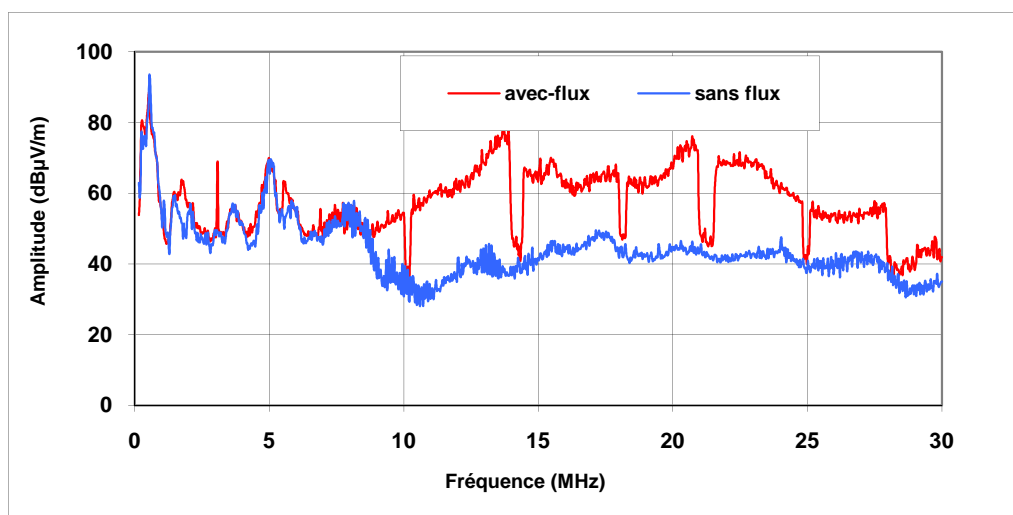


Figure 149. Mesure du champ E en chambre anéchoïque - bande [150kHz, 30MHz]

Des travaux menés sur le rayonnement des systèmes CPL [70] montrent que le rayonnement électromagnétique d'un réseau électrique simple est provoqué par les courants de mode commun et de mode différentiel. En champ proche, la contribution du courant de

mode différentiel s'atténue plus rapidement en fonction de la distance que celle du mode commun. Le courant de mode commun peut être engendré par la dissymétrie du réseau électrique provoquée par les câbles et les appareils domestiques. La dissymétrie des coupleurs intégrés aux modems CPL peut favoriser ce courant de mode commun. En champ lointain, le champ électromagnétique produit par les courants du mode commun est prédominant. Son atténuation est proportionnelle au carré de la distance par rapport à la source de rayonnement. Dans le but d'identifier le type de mode contribuant au rayonnement du champ E et du champ H dans notre étude, nous avons mesuré les courants de mode commun et de mode différentiel à la sortie du modem émetteur. Cette mesure a été réalisée à l'aide d'une pince FCC52 et d'un analyseur de spectre.

Les allures des courants obtenus sont comparées à celles des champs E et H sur la Figure 150. Nous constatons que le courant de mode différentiel est plus important que le courant de mode commun, en moyenne 31dB d'écart. Les courbes du champ H et du courant de mode commun sont superposées entre 150kHz et 5MHz. Elles s'écartent au-delà de cette fréquence. Cependant, notons qu'il existe une bonne corrélation entre l'évolution des deux. Même si le courant de mode différentiel est le plus important, l'évolution du champ E semble liée à la variation du courant mode commun. Ces observations amènent à dire que, dans notre cas, le courant de mode commun domine le mécanisme de rayonnement du réseau électrique. Cette remarque ne sera peut être pas valable pour des distances inférieures à 1m. Plus d'investigations nous semblent nécessaires afin d'approfondir ces hypothèses.

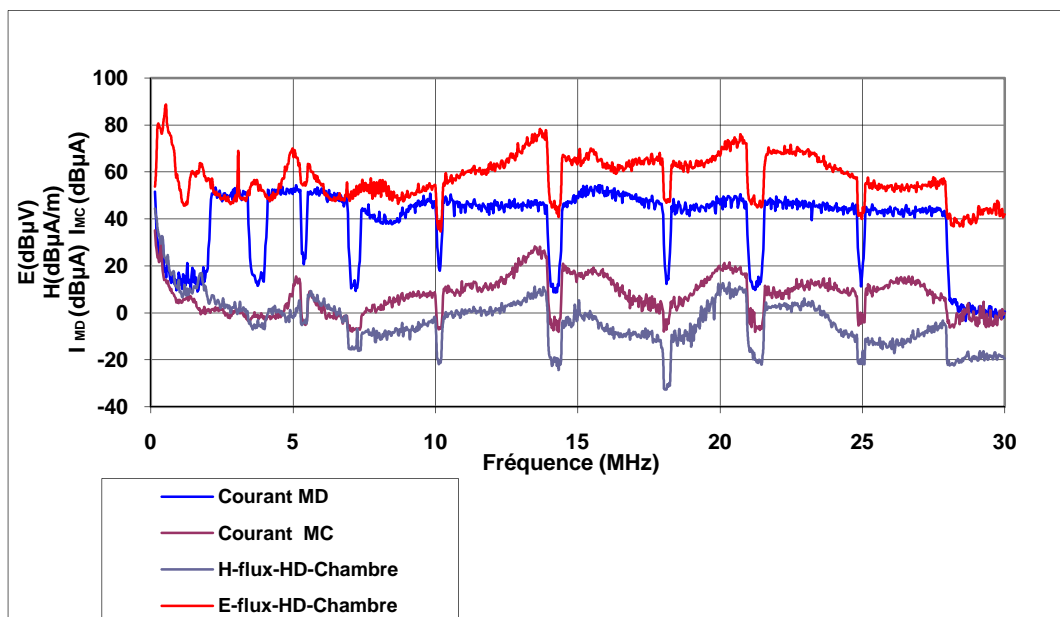


Figure 150. Comparaison des courants MD MC et des champs E et H

Ayant pour des raisons techniques puis par choix raisonnés testés de multiples configurations, voyons le rôle de chacun des paramètres modifiés.

b) Contribution de la géométrie, du type de flux et de la technologie des câbles

La géométrie du réseau électrique du banc PLC READY du LAN a été modifiée pour des raisons de transportabilité (chambre et extérieur). Nous pouvons considérer cette transformation pour voir l'impact global de la structure de câblage sur le champ électromagnétique rayonné. La Figure 151 et la Figure 152 donnent une comparaison des champs mesurés à l'extérieur (réseau électrique rectangulaire) et ceux obtenus au LAN (réseau au mur). Les courbes de champ électrique ont presque la même tendance entre 150kHz et 12MHz avec un écart maximal de 20dB observé à 10,5MHz. Elles présentent un pic de rayonnement respectivement observé à 12,7MHz au LAN et à 14MHz en chambre anéchoïque. En revanche, au-delà et jusqu'à 25MHz, nous observons une influence sensible de la géométrie sur le champ électrique rayonné. Le champ mesuré en chambre est plus intense, avec une amplitude maximale égale à 75dB μ V/m, et est caractérisé par un spectre dont la forme rappelle celle d'un signal CPL conduit, où les fréquences radioamateur sont éteintes (non utilisées par les modems CPL haut débit). Dans la bande 25MHz-30MHz, le niveau du champ électrique rayonné est presque le même dans les deux cas avec un écart maximal égal à 8,5dB.

Contrairement au champ électrique, le champ magnétique mesuré pour les deux géométries évolue de façon identique avec une différence d'amplitude maximale égale à 20dB. Le champ magnétique mesuré à l'extérieur possède quatre pics déjà observés sur le champ magnétique de référence. Ils sont essentiellement provoqués par des sources externes. Nous pouvons aussi noter que le spectre du champ magnétique est similaire pour les deux cas (chambre anéchoïque et LAN).

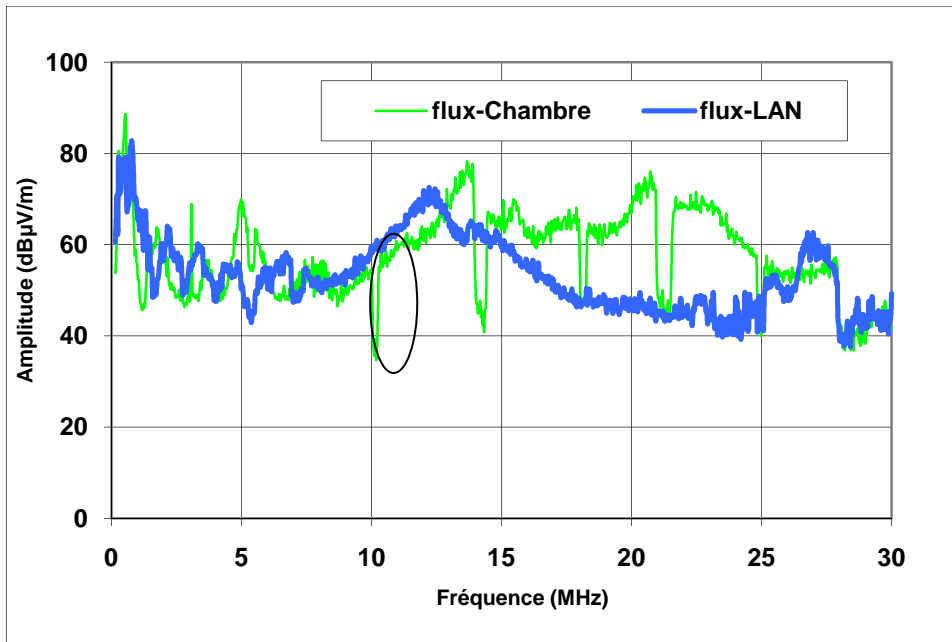


Figure 151. Comparaison champ électrique (PLC READY et extérieur)

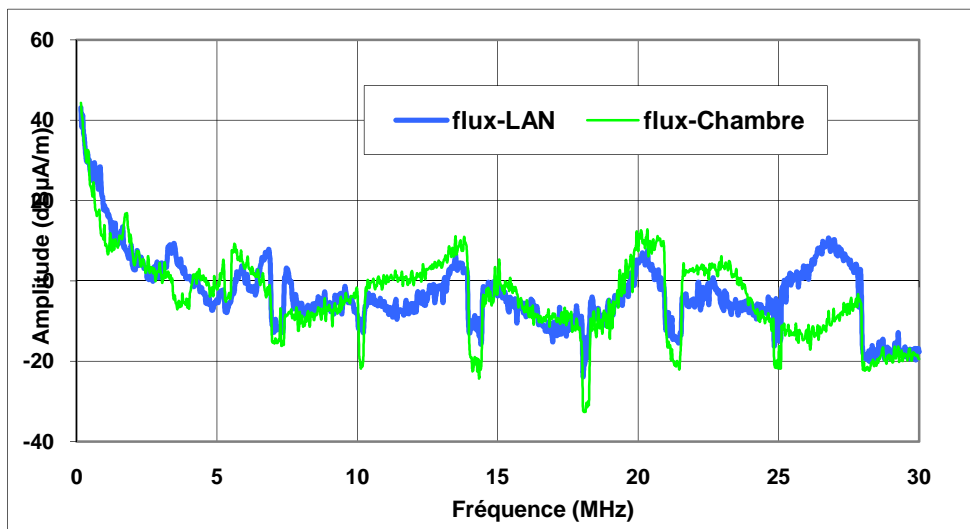


Figure 152. Comparaison champ magnétique (PLC READY et extérieur)

En conclusion, le champ électrique est plus tributaire de la géométrie du réseau que le champ magnétique à la distance de mesure considérée (à savoir 1m).

La géométrie du réseau électrique n'est pas le seul facteur à prendre en compte, le site de mesure et son environnement en sont deux autres. Le banc de test du LAN est installé verticalement sur un mur en placoplâtre. Les câbles électriques sont déployés dans les faux plafonds et sous le plancher, d'une façon aléatoire mais au voisinage de l'installation électrique du reste du bâtiment. Ajoutons à cela la dissymétrie du réseau électrique due aux câbles électriques utilisés et aux appareils domestiques qui y sont connectés. Malgré les filtres placés en amont du banc de test PLC READY, des phénomènes de couplage peuvent survenir

en aval de ces filtres et impacter le rayonnement des champs. Les mesures sur ce réseau électrique amovible sont plus faciles à maîtriser, celui-ci pouvant être placé dans un environnement plus clément.

Lors des différents essais de transmission de données par CPL, nous avons utilisé deux types de flux vidéo (HD et SD), ce qui impose des débits Ethernet différents, donc des débits physiques différents (4Mbits/s pour le flux SD et 11Mbits/s pour le flux HD). Le but était de voir l'impact du type de flux sur le spectre du champ électromagnétique rayonné. Les résultats obtenus dans la bande 150KHz-30MHz pour les deux types de flux sont représentés sur la Figure 153 et la Figure 154. Nous constatons que le type de flux vidéo n'a que très peu d'effet sur le champ EM rayonné. En effet, les modems CPL émettent un signal large bande dont la densité spectrale est limitée à -50dBm/Hz quelque soit le débit Ethernet. D'où l'influence minime sur le champ rayonné. Les champs E et H dépendent des courants de mode commun et de mode différentiel circulant sur les fils électriques. L'amplitude de ces courants est par contre tributaire de l'impédance du réseau électrique et de la fréquence du signal [67].

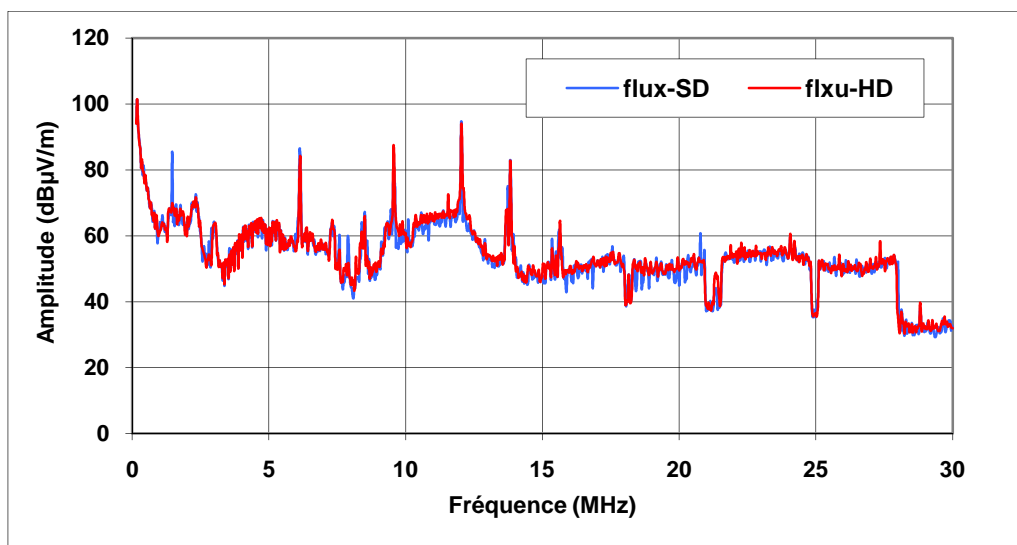


Figure 153. Impact du type de flux vidéo sur le champ électrique rayonné entre 150kHz et 30MHz

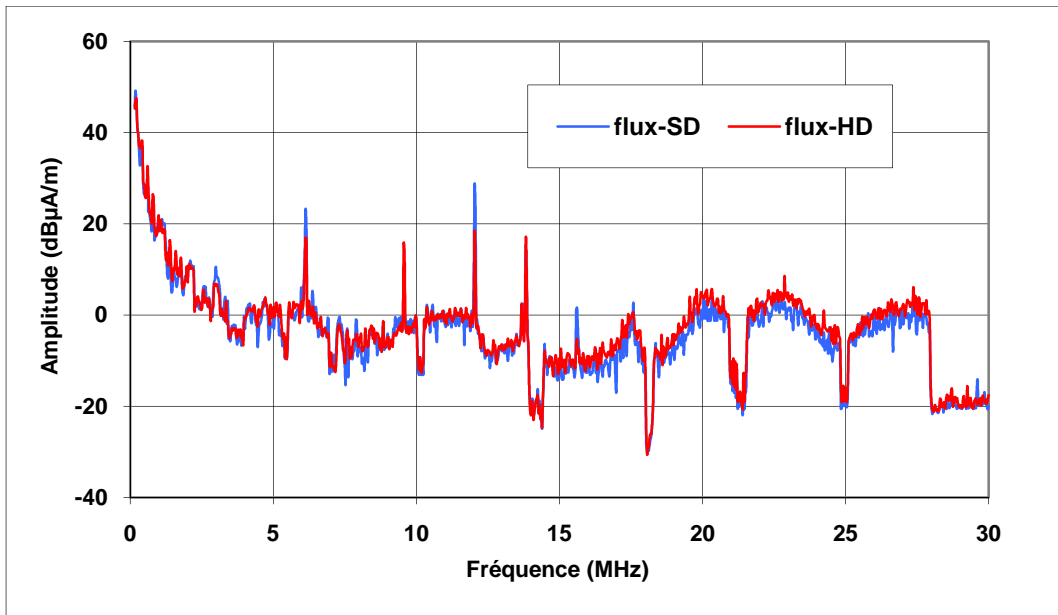


Figure 154. Impact du type de flux vidéo sur le champ magnétique rayonné entre 150kHz et 30MHz

Deux technologies de câbles ont été utilisées pour réaliser le réseau électrique. Le câble classique dit RO2V est constitué de trois conducteurs de 2,5mm² (phase, neutre et terre) isolés individuellement et maintenus ensemble par une gaine. Un câble écrané possédant en plus un film mince en aluminium placé entre les deux gaines de maintien des conducteurs et qui constitue un écran électromagnétique qui peut être raccordé à la terre. La Figure 155 et la Figure 156 comparent les performances des deux types de câbles dans la bande 150kHz-30MHz du point de vue du rayonnement EM. Les courbes de champ électrique suivent la même évolution en fonction de la fréquence et sont très proches dans la bande 150kHz-17MHz à l'exception de l'écart d'amplitude constaté à 14MHz et égal à 12dB. Le câble écrané rayonne un champ électrique plus faible dans la bande 17MHz-30MHz avec un écart moyen d'amplitude égale à 14dB.

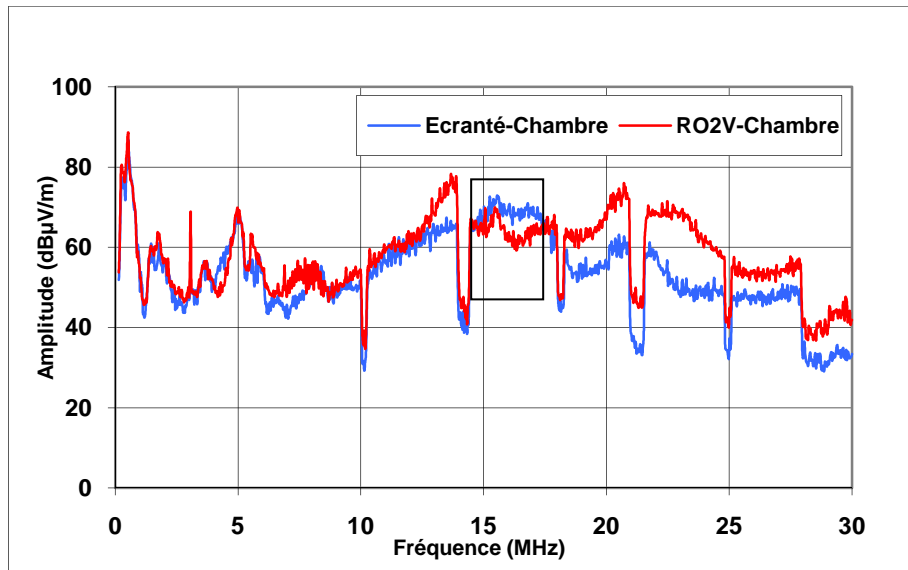


Figure 155. Champ électrique rayonné par le câble RO2V et le câble écrané

L'efficacité de ce type de câble spécifique n'est clairement visible qu'à partir de 17MHz où l'épaisseur du film d'aluminium (inférieure à 300µm) joue le rôle d'écran électromagnétique. Cette épaisseur est alors comparable à celle de l'effet de peau qui est fonction de la fréquence. L'épaisseur de peau varie de 213µm à 150kHz à 15,5µm à 30MHz pour l'aluminium. En plus de cet effet d'écran, l'impédance caractéristique du câble est plus faible avec l'effet capacitif induit entre les fils et l'écran électromagnétique. Ce paramètre agit aussi sur le rayonnement électromagnétique de ce câble. Cependant, il est difficile de distinguer la contribution de chaque phénomène car ils sont présents simultanément.

D'après les résultats de mesure en chambre anéchoïque sur le champ H, nous observons que le câble écrané rayonne moins que le câble RO2V dans la bande 150kHz-30MHz à l'exception des tranches de fréquences [5,25MHz, 6,90MHz] et [21,7MHz, 26MHz]. Dans ces bandes fréquentielles le champ H issu du câble écrané est plus important avec un écart moyen égal à 6,7dB. Cependant, les deux spectres mesurés sont similaires d'allure et sont caractéristiques d'une transmission par CPL.

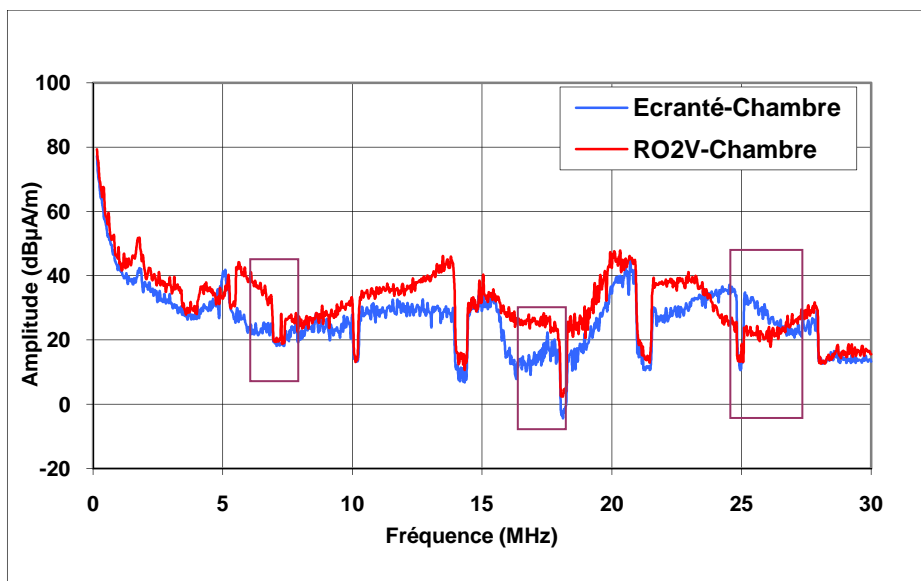


Figure 156. Champ magnétique rayonné par le câble RO2V et le câble écrané

Comparé au champ électrique, le champ magnétique provenant du câble écrané est légèrement plus faible en proportion (6,2dB en moyenne sur toute la bande).

c) Dissymétrie, taux de conversion de mode et rayonnement CPL

La dissymétrie du réseau électrique domestique est due à la qualité du câble électrique, à sa topologie et aux appareils électriques domestiques qui y sont connectés. Elle est à l'origine de l'apparition d'un courant mode de commun. Nous avons pu discerner la contribution de ce mode de conduction sur le rayonnement du champ électromagnétique. Le taux de conversion longitudinale de mode, nommé LCL (Longitudinal Conversion Loss), est un concept très utilisé dans le monde des télécommunications. Il est pris en considération dans les standards dédiés aux systèmes de télécommunication afin d'estimer le taux de dissymétrie. Citons à titre d'exemple la norme ETSI TS101952 et le standard ITU-G117 décrivant le protocole de mesure du paramètre LCL. La norme CISPR 22 ne considère que le mode commun pour tester les ports de communication.

La minimisation du taux de conversion de mode permet de limiter les interférences électromagnétiques émises par le dispositif. Cela est impossible pour le cas des réseaux électriques domestiques à cause de leur topologie très complexe.

Le protocole de mesure du LCL des systèmes de télécommunication est déterminé par les organismes de standardisation (ETSI-IEEE-ITU...) [71]. L'estimation expérimentale du LCL d'un réseau électrique en fonctionnement n'est pas une tâche facile, et diffère de la mesure du LCL sur des paires torsadées où le support de transmission a une topologie fixe en

fonction du temps et une caractéristique peu variable en fonction de la fréquence. Pour pouvoir estimer la dissymétrie de nos bancs de test au niveau de la prise d'injection du signal CPL, nous avons adapté la méthode de mesure de LCL stipulée dans la norme ITU-G117 à notre problématique, en ajoutant deux capacités de découplage afin de filtrer la composante 50Hz. L'apport de ces composants en terme de LCL est compensé lors de la calibration. Dans notre cas, les charges de terminaison (résistances 50Ω) sont remplacées par l'impédance de l'ensemble modem CPL récepteur et des charges domestiques en fonctionnement, branchés à notre réseau. Cette approche nous permettra de mesurer le LCL vu par le modem CPL émetteur lors de la transmission. L'expérience consiste à injecter un courant de mode commun (sur la phase et sur le neutre) et de mesurer la tension différentielle entre les deux. L'injection du courant et la mesure se font par le biais d'un ballun (transformateur) North Hills 03320BF 50Ω-50Ω dont la bande passante est de 30kHz-60MHz. L'excitation et la mesure sont réalisées en utilisant un analyseur de réseau scalaire (PSM) ayant une impédance d'entrée et de sortie égales à 50Ω. Le LCL est le rapport entre la tension U_L du générateur sur la tension U_T mesurée entre la phase et le neutre dans la bande fréquentielle 150kHz-30MHz (voir Équation 82).

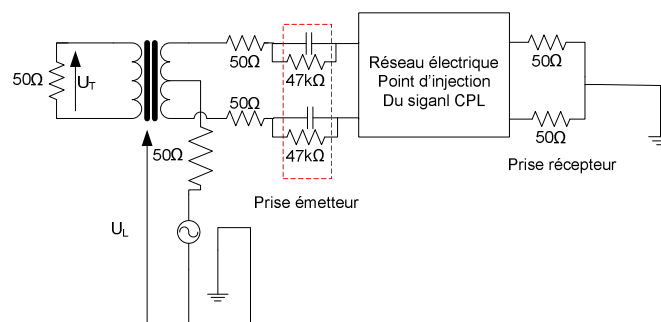


Figure 157. Banc de test LCL

$$LCL_{dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_L}{U_T}\right) \quad \text{Équation 82}$$

Le LCL mesuré (en valeur absolue) est comparé au champ électrique mesuré sur le banc de test PLC READY installé au LAN (voir Figure 158). Nous constatons que la courbe du LCL varie entre -40dB et -69dB en basse fréquence (150kHz-6MHz) et oscille entre -37dB et -50dB au delà de cette bande.

En comparant l'évolution des champs E et H avec celle du LCL, en fonction de la fréquence, nous remarquons que les deux types de courbes sont décorréliées pour les fréquences inférieures à 1MHz. Nous pouvons supposer que les interférences rayonnées en

dessous de 1MHz sont plutôt produites par les appareils électriques domestiques utilisés et non pas par les modems CPL, sous l'hypothèse qu'un lien fiable existe entre le champ rayonné et le LCL. Entre 800kHz et 3MHz, les champs E et H décroissent en fonction de la fréquence avec un écart moyen de 50dB entre eux. L'allure du LCL relevé dans cette bande suit la même décroissance. Le même phénomène est observé entre 6MHz et 20MHz où l'écart entre les champs est égal à 40dB. Au voisinage de 3MHz, le nombre de points de mesure insuffisant laisse apparaître un décalage fréquentiel entre les maxima et les minima de la courbe du LCL et ceux du champ H. Cependant, les évolutions de ces deux courbes sont presque similaires. Ceci n'est pas le cas pour le champ électrique où on relève une amplitude égale à 54,4dB μ V/m pour un LCL de 62dB et 71dB μ V/m pour 51dB de LCL. A ce stade il est difficile de faire le lien entre le taux de conversion de mode et le champ électromagnétique émis par le réseau électrique car les mesures de ces grandeurs n'ont pas été simultanées et le réseau électrique a un caractère fréquentiel susceptible de varier en fonction du temps.

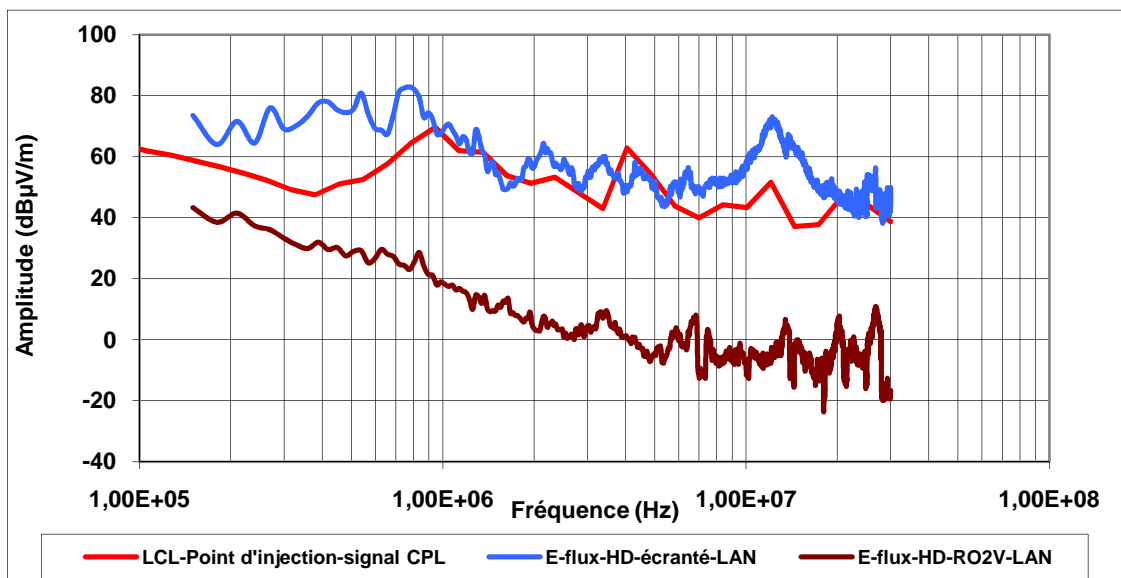


Figure 158. LCL-Champ E et Champ H rayonnés

Pour montrer qu'un lien existe entre le champ rayonné et le LCL nous avons volontairement provoqué un déséquilibre entre l'impédance du fil du neutre et celui de la phase en connectant une résistance de puissance de 30 Ω en série avec le modem CPL (voir la Figure 159). Ce déséquilibre augmente l'amplitude du champ électrique rayonné dans la bande 14MHz-30MHz (voir la Figure 160).

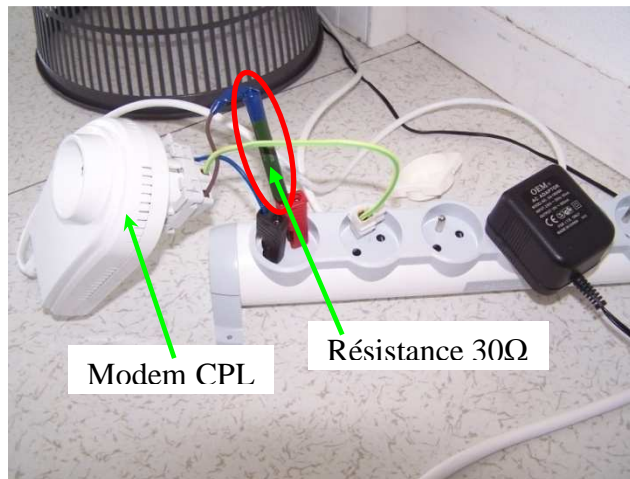


Figure 159. Branchement de la résistance de déséquilibre

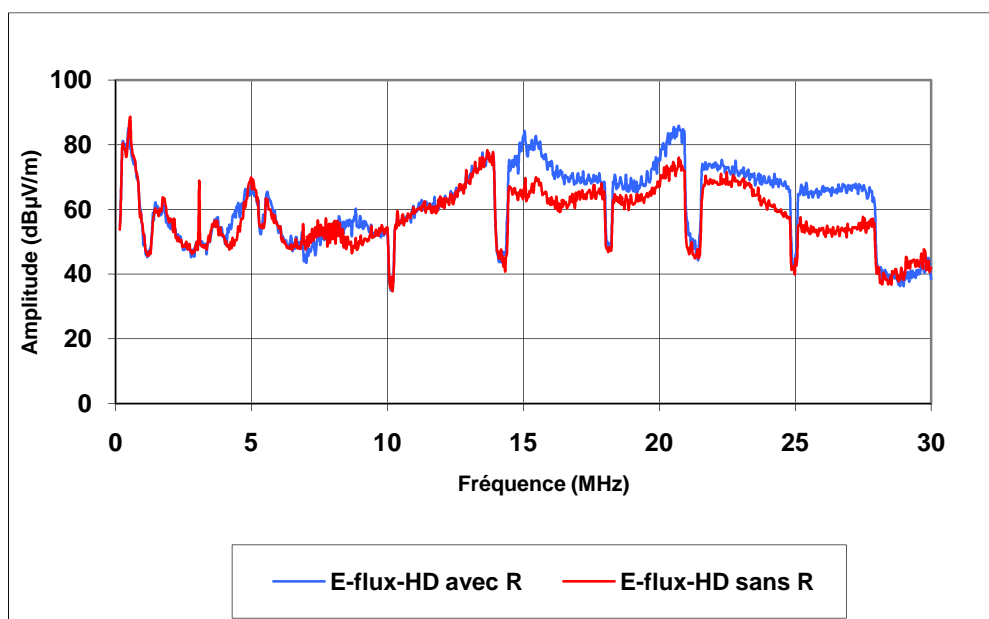


Figure 160. Champ électrique du réseau déséquilibré

d) Champ EM rayonné et normes

L'impact du rayonnement électromagnétique sur la santé de la population est une question d'ordre sanitaire et écologique. Plusieurs articles plaident contre la technologie CPL en supposant que son utilisation au sein de l'habitat expose constamment les individus à un champ électromagnétique à fréquence variable, nuisible pour la santé. Hors, jusqu'à présent aucune étude scientifique n'a fait un lien solide entre l'exposition au champ électromagnétique et l'apparition de certaines maladies ou symptômes à l'exception de l'augmentation de la température corporelle qui reste inférieure à 1°C [72]. L'impact du rayonnement CPL sur la santé ne rentre pas dans le cadre de notre travail. Néanmoins, nous avons comparé le niveau des champs électrique et magnétique mesurés à la restriction de base

sur l'exposition aux champs électrique et magnétique pour une fréquence inférieure à 10GHz. La Figure 161 et la Figure 162 montrent la comparaison entre quelques résultats de mesure avec le niveau limite d'exposition de la population générale aux champs électrique et magnétique. Pour la bande 150kHz-30MHz le champ E rayonné est 80dB en dessous de la limite. Entre 150kHz et 30MHz, son niveau reste en moyenne 80dB en dessous de la valeur limite. Ces observations ne sont valables que dans le cas de notre banc de test et ne doivent pas être généralisées à un réseau électrique domestique quelconque sans précautions.

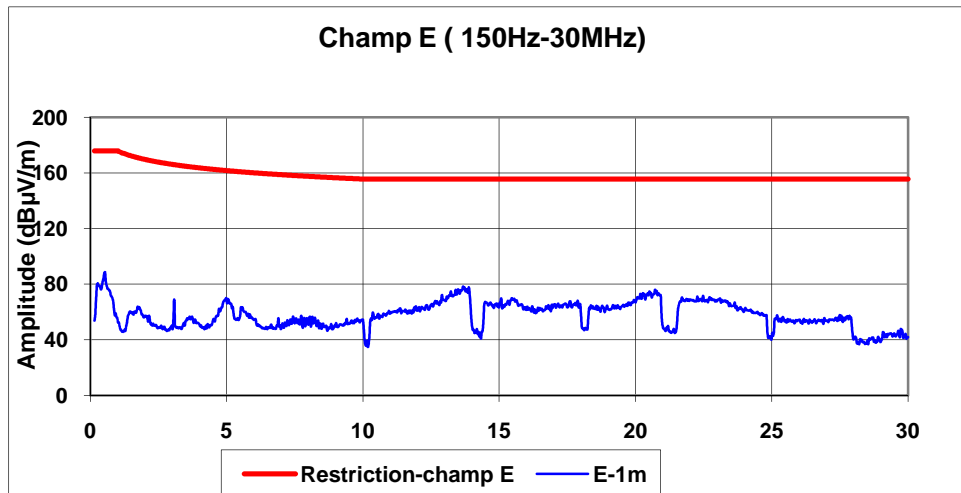


Figure 161. Champ E mesuré à 1m et la restriction de base à l'exposition

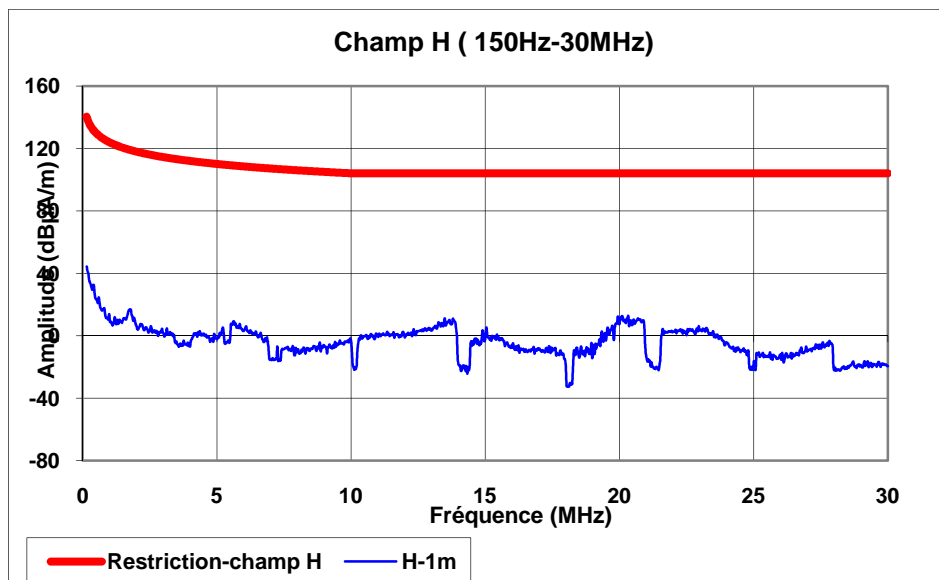


Figure 162. Champ H mesuré à 1m et la restriction de base à l'exposition

4 Conclusion

L'analyse du réseau électrique en termes de bruit conduit et de champ électromagnétique rayonné a été développée. Le bruit généré par plusieurs équipements électriques domestiques a été mesuré directement à la source puis comparé au bruit global du réseau électrique. Cela a permis de montrer que le bruit produit par les appareils ayant un convertisseur de puissance varie d'une manière périodique synchrone incluant des pics périodiques asynchrones

La campagne de mesure du champ électromagnétique rayonné a permis d'étudier l'impact de la géométrie du réseau électrique, du type de flux de données transmis par CPL et du type de câble électrique utilisé. Ces mesures ont été effectuées dans des conditions de transmissions réelles dans trois environnements différents. Les résultats obtenus montrent que le rayonnement électromagnétique des signaux CPL est situé dans la bande de fréquences 1MHz-30MHz. La géométrie du réseau électrique agit sur l'évolution du spectre du champ électromagnétique rayonné. Lors d'une transmission CPL, le débit Ethernet minimal est imposé par le type de flux émis (vidéo SD et HD). Le champ électromagnétique mesuré pour ces deux types de flux est similaire.

Les mesures du champ électromagnétique rayonné ont été complétées par une mesure des courants de mode commun et de mode différentiel générés par les modems CPL. La comparaison de ces grandeurs a mis en évidence le lien entre le champ électromagnétique et le courant de mode commun. L'apparition de ce courant est favorisée par la dissymétrie du réseau électrique. Cette dissymétrie a été exprimée en fonction du taux de conversion de mode (LCL). En effet, plus le LCL du réseau électrique est élevé, plus le champ électromagnétique rayonné est important. Par ailleurs, l'utilisation d'un câble électrique écrané permet de réduire le rayonnement électromagnétique du signal CPL dans certaines bandes de fréquences.

Conclusion

