

# CARACTÉRISATION RADIOÉLECTRIQUE DE L'ENVIRONNEMENT DOMESTIQUE

Jean-Baptiste CLAUSSE\*/\*\*\*, Michel TERRE\*\*\*, Richard RAZAFFERSON\*, Ahmed ZEDDAM\*\*

\* / \*\* France Télécom Recherche & Développement,

\* 38/40 rue du Général Leclerc – 92794 Issy-les-Moulineaux Cedex 9 – France

\*\* 2 avenue Pierre Marzin – 22307 Lannion – France

[jbc@isep.fr](mailto:jbc@isep.fr), {richard.razafferson, ahmed.zeddam}@orange-ftgroup.com

\*\*\* Conservatoire National des Arts et Métiers,

292 rue Saint Martin – 75003 Paris - France, [terre@cnam.fr](mailto:terre@cnam.fr)

## I. INTRODUCTION

Cet article s'intéresse aux rayonnements électromagnétiques de divers équipements domestiques comme les systèmes d'éclairages (les lampes dites "à basse consommation" (BC) et les tubes fluorescents), les fours à micro-ondes et les ordinateurs portables. Apparu récemment dans l'usage collectif, le niveau de radiations des lampes BC est souvent sujet à discussions dans différents forums alliant la santé et les radiofréquences [[www.sante-radiofréquences.org](http://www.sante-radiofréquences.org)]. Ces nouveaux dispositifs ne sont cependant pas tous suffisamment étudiés dans la littérature actuelle.

## II. CARACTERISATION DU RAYONNEMENT DES LAMPES À BASSE CONSOMMATION

### II.1 PROTOCOLE DE MESURE

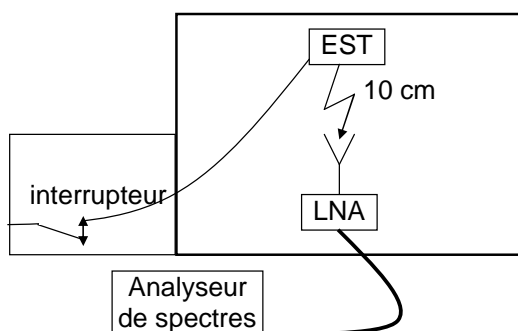


Fig. 1 – Protocole expérimental.

Pour mesurer le rayonnement des lampes BC, nous avons utilisé une chambre anéchoïque dans laquelle étaient disposés la lampe étudiée (EST : équipement sous test), une antenne, variant selon les bandes de fréquences et placée à 10 cm de l'EST. On insère aussi, afin d'améliorer la sensibilité de la chaîne de mesure, un LNA de 48 dB en sortie de l'antenne. Enfin, une partie du câble d'alimentation de la lampe

est située à l'intérieur de la chambre. La partie du câble d'alimentation contenant l'interrupteur se trouve dans une mini-chambre au blindage plus léger. Le signal en sortie du LNA est dirigé, via un câble blindé, vers un analyseur de spectres situé en dehors des chambres et relié à un ordinateur pour le rapatriement des mesures. L'analyseur de spectres effectue ses mesures dans une bande de résolution de 100 kHz.

L'étude a été menée dans trois bandes de fréquences étudiées (30 – 200 MHz, 200 – 1 000 MHz et 1 - 6 GHz) avec trois antennes différentes. Nous avons relevé les niveaux de champ dans les configurations suivantes : lampe éteinte, allumage de la lampe (jusqu'à la stabilisation des niveaux de champ perçus sur l'analyseur) et lampe allumée.

### II.2 . RÉSULTATS

#### II.2.1 Mesures entre 1 et 6 GHz

Lors des trois configurations analysées, aucune incidence sur le niveau de champ n'a été détectée. Compte tenu de la sensibilité de mesures du protocole, égale à 20 dB $\mu$ V/m par canal de 100 kHz et au-dessus de 1 GHz, on peut donc considérer qu'il n'y a pas de rayonnement mesurable dans la bande de fréquences de 1 à 6 GHz. Nous ne présenterons donc pas de courbes pour ces mesures.

#### II.2.2 Mesures entre 200 MHz et 1 GHz

##### III.2.2.1 Analyse des états stationnaires

Les mesures effectuées dans des états stationnaires (lampe allumée ou éteinte) n'ont mis en évidence aucune contribution radioélectrique de la lampe. Les champs ambiants évoluant entre 10 et 20°dB $\mu$ V/m.

Sur les graphes de la figure 2, nous pouvons repérer le signal TV (30 dB $\mu$ V/m autour de 500 MHz) et le signal GSM (50 dB $\mu$ V/m autour de 900 MHz). La seule voie possible de pénétration de ces signaux à l'intérieur de la chambre est le câble d'alimentation de

la lampe. C'est donc ce dernier qui a joué le rôle de guide d'ondes et qui est responsable de ce rayonnement.

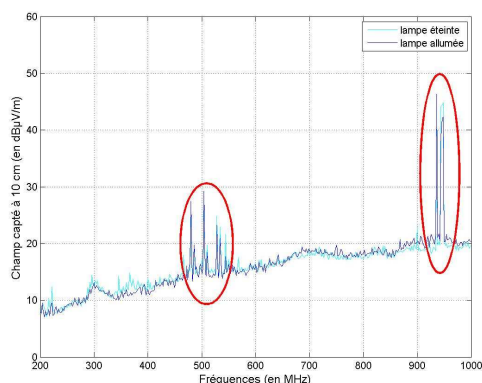


Fig. 2 – Comparaison lampe allumée / lampe éteinte.

### II.2.2. 2 Analyse des états transitoires

Lors de l'allumage de la lampe, nous avons pu constater l'apparition de bruits impulsifs. Ce phénomène transitoire impulsif dure entre 5 à 10 secondes, ce qui est un peu plus long que l'allumage proprement dit de la lampe qui dure une à deux secondes.

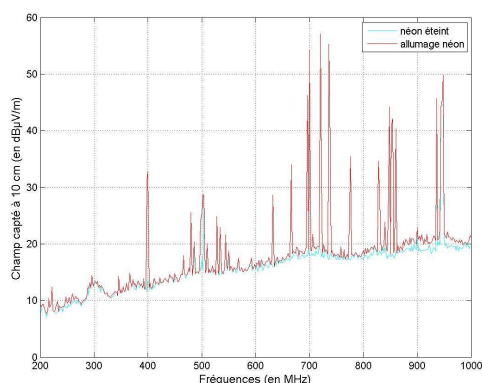


Fig. 3 – Comparaison allumage lampe / lampe éteinte.

Sur les graphes de la figure 3, on repère encore les signaux TV et GSM. Issus de la lampe, on observe des niveaux de champ supérieurs à 50 dBμV/m. Ces niveaux sont assez proches du niveau maximal autorisé par la CISPR-22 [5] à 1 mètre, alors que les mesures ont été effectuées à 10 cm.

## II.2.3 Mesures entre 30 et 200 MHz

### II.2.3.1 Analyse des états stationnaires

Lors de cette analyse, une élévation du champ électrique a pu être décelée en dessous de 160 MHz. Nous voyons que cette élévation est suffisante pour recouvrir le signal FM (autour de 100 MHz) qui s'est propagé à travers le câble d'alimentation. Cependant, le champ maximal mesuré pour une lampe allumée

(vers 30 MHz) reste inférieur à 30 dBμV/m alors qu'il variait entre 0 et 10 dBμV/m pour une lampe éteinte.

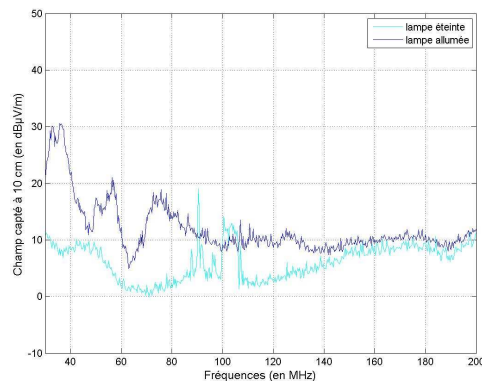


Fig. 4 – Comparaison lampe allumée / lampe éteinte.

### II.2.3.2 Analyse des états transitoires

Lors de cette analyse, la présence de bruits impulsifs a encore pu être mise en évidence sur le haut de la bande d'analyse. La figure 5 présente deux salves d'allumage, mettant en exergue le caractère hautement statistique des fréquences des impulsions. On a pu constater que le niveau de champ se stabilisait au bout d'une dizaine de secondes. Les niveaux maximaux de champs induits par le bruit impulsif est de l'ordre de 50 dBμV/m.

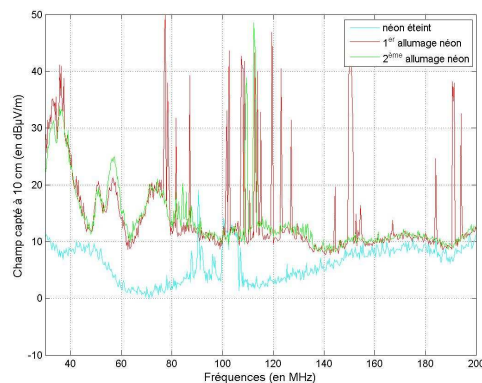


Fig. 5 – Comparaison allumage lampe / lampe éteinte.

## III. COMPARAISON D'AUTRES SOURCES DE RAYONNEMENT

Les mesures présentées dans cet article peuvent être confrontées à d'autres sources de rayonnement que l'on rencontre dans l'environnement domestique comme : les tubes fluorescents [1], les fours à micro-ondes [2] et les ordinateurs portables.

### III.1 Rayonnements des éclairages

Nous allons présenter une analyse théorique du rayonnement électromagnétique puis une analyse expérimentale des tubes fluorescents. Nous

présenterons ensuite les résultats préliminaires d'expériences sur les lampes basses consommation.

### III.1.1 Analyse théorique

Le rayonnement des tubes est un rayonnement constitué de rafales d'impulsions dont les caractéristiques (temps d'inter-arrivée, fréquence, durée, amplitude, nombre) suivent des lois statistiques.

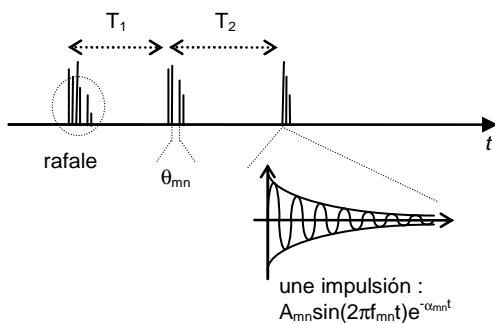


Fig. 6 – Représentation schématique du rayonnement

Le tableau ci-dessous présente les différents paramètres obtenus.

Paramètre	Valeur
$\mu_{nb}$	4.77
$nb_{max}$	13
$\mu_{ni}$	6.29
$ni_{max}$	53
$\mu_{tb}$	$386 \cdot 10^{-3} s$
$\mu_{ti}$	$13.79 \cdot 10^{-6} s$
$\sigma_{ti}$	$8.27 \cdot 10^{-6} s$
$\mu_A$	0.8 V
$\sigma_A$	0.3 V
$A_{max}$	2.5 V
$\mu_f$	1 GHz
$\sigma_f$	0.5 GHz
$\mu_\alpha$	$5 \cdot 10^7 s^{-1}$
$\sigma_\alpha$	$4 \cdot 10^9 s^{-1}$

Table 1 - Paramètre pour les lois discrètes du modèle de bruit des tubes fluorescents (coups et rafales)

### III.1.2 Analyse expérimentale

Nous avons pu procéder à des analyses expérimentales sur ces deux systèmes d'éclairage.

Les tubes fluorescents ont été l'objet d'étude en laboratoire entre 900 et 2 900 MHz sur les états stationnaires (allumés et éteints) et les états transitoires. Une campagne a pu être menée sur un tube incapable de stabiliser la lumière et donc rayonnant en permanence.

Lors des analyses dans une chambre anéchoïque, aucune différence n'a été observée entre les états stationnaires allumés et éteints dans la bande d'observation. Les observations sur les régimes transitoires ont montré des rayonnements au moment

de l'allumage des tubes, alors que l'interrupteur était en dehors de la chambre.

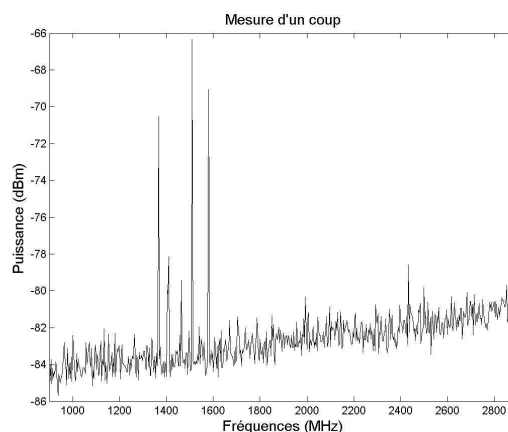


Fig. 7 – Allumage d'un tube néon

Sur la figure 7, nous constatons un rayonnement autour de 1 500 MHz. La figure 8 nous montre que ce rayonnement est aléatoire et peut atteindre 2 GHz.

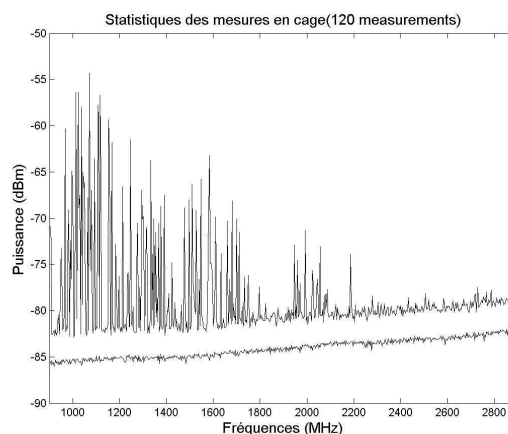


Fig. 8 – 60 allumages d'un même tube néon

Lors d'une campagne sur le terrain [1], l'analyse d'un tube défectueux a montré que le rayonnement consécutif à la tentative d'allumage était à même de perturber les fréquences comprises entre 150 KHz et 2 GHz, et donc les communications TV et FM.

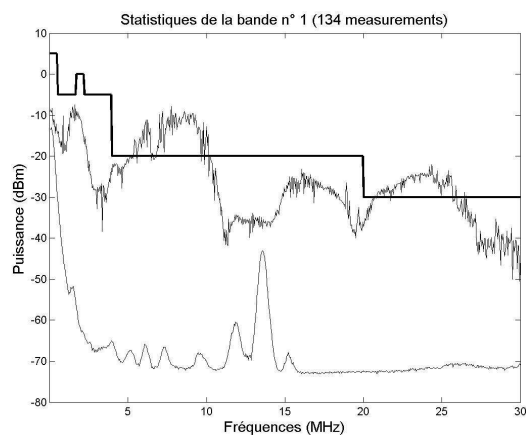


Fig. 9 – mesures en-dessous de 30 MHz

Sur les graphes présentés, les niveaux limites de la CISPR-22 [5] ont été rajoutés.

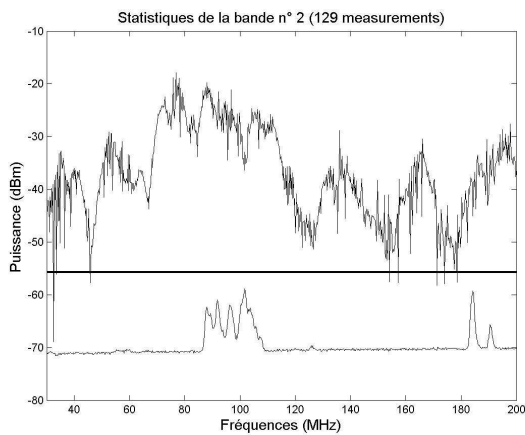


Fig. 10 – Mesures entre 30 et 200 MHz

Les courbes inférieures représentent les niveaux minima observés.

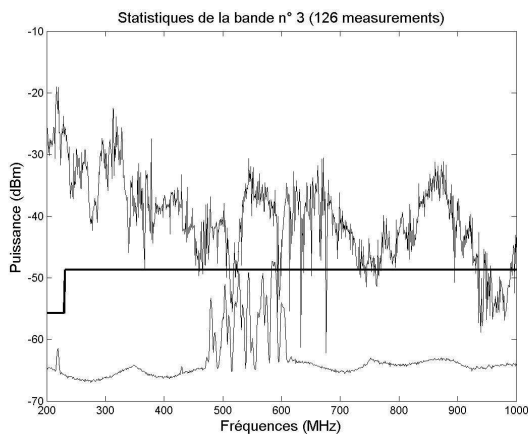


Fig. 11 – Mesures entre 200 et 1 000 MHz

Les courbes supérieures représentent les niveaux maxima observés.

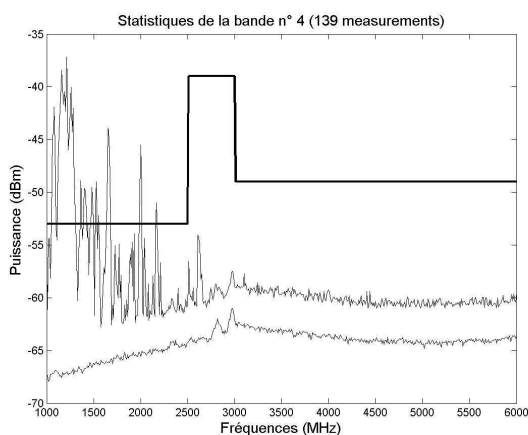


Fig. 12 – Mesures entre 1 et 6 GHz

Nous pouvons constater que les limites sont souvent dépassées, surtout entre 30 et 1 000 MHz et que l'incertitude de mesure est de 4 dB

### III.2 Rayonnement des fours micro-ondes

Nous allons présenter le rayonnement des fours à micro-ondes avec une description théorique et des compléments d'informations collectées lors de mesures sur le terrain.

#### III.2.1 Analyse théorique

Le rayonnement des fours à micro-ondes est défini par des règles propres à chaque constructeur et est reproductible d'un essai à l'autre. Il prend en compte des taux d'activité et des amplitudes sur des cycles qui dépendent du fonctionnement du magnétron et du mode de cuisson choisi.

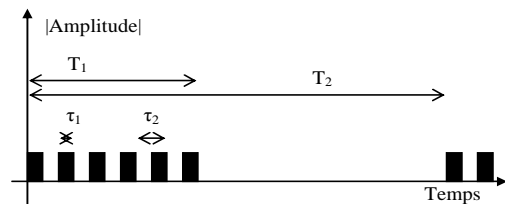


Fig. 13 – Modèle de rayonnement d'un four

Ce principe reste valable pour tous les fours mais les valeurs de certains paramètres peuvent varier d'un four à l'autre.

Paramètre	Valeur
$\tau_1$	$10^{-2}$ s
$\tau_2$	$m.T_2$
$T_1$	$2.10^{-2}$ s
$T_2$	30 s

Table 2 - Paramètre pour les lois discrètes du modèle de bruit des tubes fluorescents (coups et rafales)

Le paramètre  $m$  dépend du mode de cuisson choisi. Celui-ci n'influe pas, sur les anciens modèles, sur le rayonnement émis par le four à micro-ondes mais juste sur le temps de relaxation.

#### III.2.2 Analyse expérimentale

Un modèle ancien de four à micro-ondes a été analysé en chambre anéchoïque tandis que des modèles plus récents ont été analysés dans des cuisines. Malheureusement, ces dernières mesures n'ont pu être réalisées en vis-à-vis de la porte et ne peuvent constituer un pire-cas.

Nous avons pu observer que le four à micro-ondes émettait essentiellement dans la bande ISM à 2,4 GHz mais que des rayonnements non essentiels pouvaient être observés dans la bande UWB au niveau des harmoniques de la fréquence 2,2 GHz. La face avant du four étudié rayonnait un champ plus élevé que la face arrière, avec des rayonnements hors bandes plus importants. Les cycles du magnétron sont décelables grâce à un oscilloscope numérique. Des mesures temporelles permettent aussi de mettre en évidence l'effet des modes de cuisson.

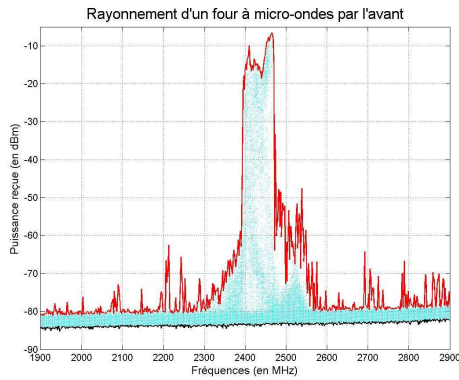


Fig. 14 – ...

La figure 14 présente le rayonnement par la face avant du four. Le niveau maximal observé reste supérieur aux masques spectraux de réception pour le WiFi (qui est fixé à  $-97 \text{ dBm/Hz}$ , soit  $-47 \text{ dBm}$  avec notre résolution) et pour les systèmes UWB ( $-51.3 \text{ dBm} \pm 10 \text{ dBm}$ ). Les niveaux proposés par l'ECC Report 24 [6] sont du même ordre que les deux précédents.

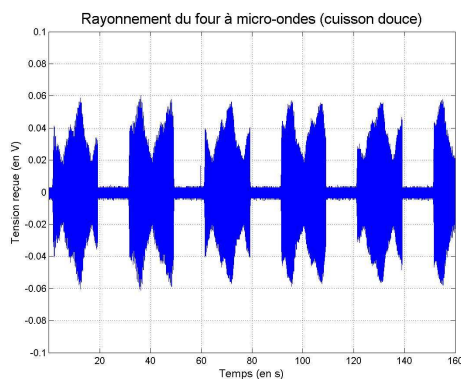


Fig. 15 – Cycle à cuisson douce

L'analyse de divers fours à micro-ondes a permis de valider certaines hypothèses et a montré une évolution technologique (due au fait qu'il s'agit d'un four combiné ?) sur le modèle le plus récent. Celui-ci avait un cycle de magnétron de 100 Hz et non de 50 Hz comme les autres et les premiers modes de cuisson influent en effet sur les niveaux de puissance.

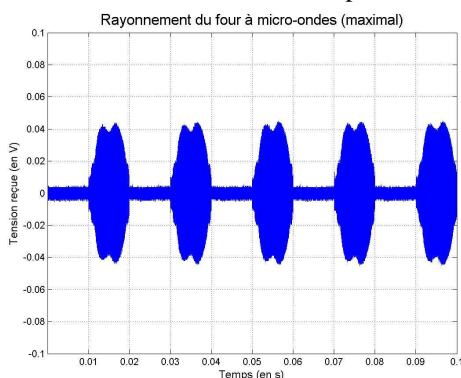


Fig. 16 – Cycle du magnétron

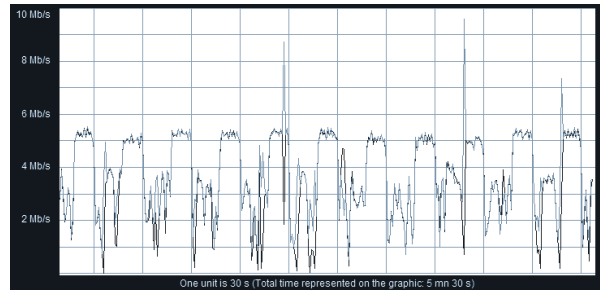


Fig. 17 – évolution du débit du canal 1 en cuisson douce

Le suivi du débit sur une connexion WiFi permet de visualiser les impacts de la mise en marche d'un four à micro-ondes. Plus le mode de cuisson est fort, plus le réseau est perturbé car les temps de relaxation sont moindres. C'est ce que nous montrent les figures 17 et 18.

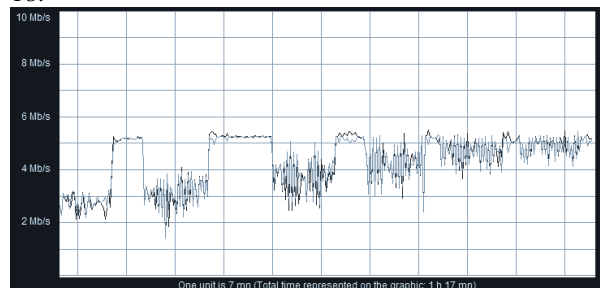


Fig. 18 – Perturbations du 1<sup>er</sup> canal WiFi

### III.3 Rayonnement des ordinateurs

Le rayonnement des ordinateurs portables semble moins compromettant pour les systèmes à courte-portée mais peut facilement perturber les récepteurs à faible sensibilité comme les récepteurs des liaisons satellites.

#### III.3.1 Analyse théorique

Les principales sources de rayonnements présentes à l'intérieur d'un ordinateur portable sont les disques durs, les bus d'accès ainsi que les microprocesseurs dont les fréquences de fonctionnement montent régulièrement.

#### III.3.2 Analyse expérimentale

Nous avons analysé divers ordinateurs portables de différentes marques et nous avons pu constater que le rayonnement, en présence d'un amplificateur, restait négligeable au-dessus de 3 GHz.

Les figures suivantes nous montrent les rayonnements émis par un ordinateur portable entre 1 et 6 GHz. Nous voyons un rayonnement important entre 1 et 2 GHz ainsi que des harmoniques que nous pouvons rapprocher de certaines caractéristiques techniques des ordinateurs étudiés. Si les niveaux actuels ne permettent pas de craindre des conséquences sur les réseaux WiFi, ils sont déjà trop élevés pour un récepteur satellite placé à proximité de l'ordinateur. De plus, les évolutions technologiques à venir pourraient décaler ou étirer la plage des fréquences



perturbées vers les hautes fréquences, atteignant ainsi les bandes ISM et perturber légèrement les seuils de sensibilités des réseaux WiFi.

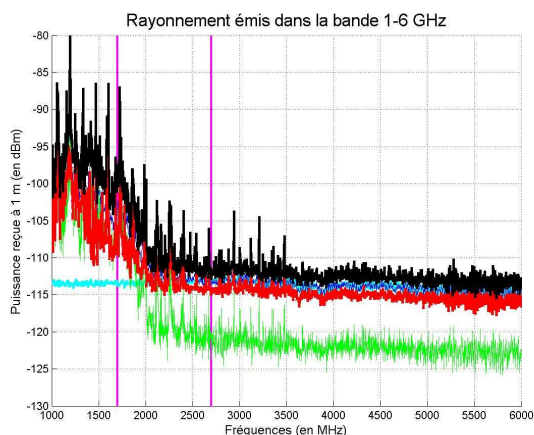


Fig. 19 – Rayonnement entre 1 et 6 GHz

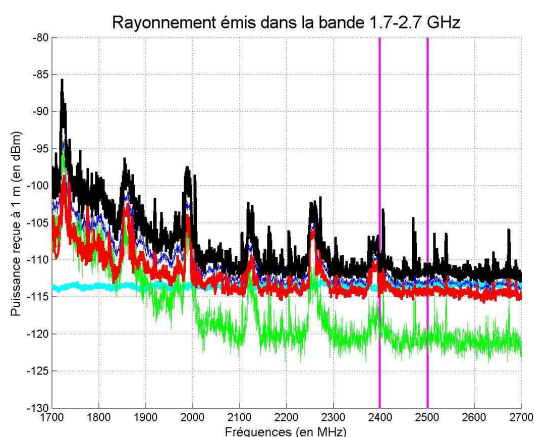


Fig. 20 – Zoom entre 1,7 et 2,7 GHz

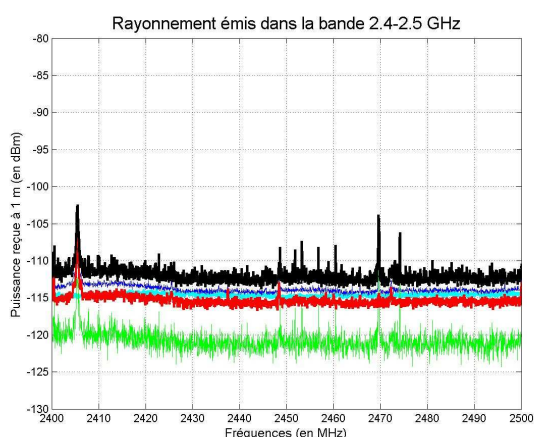


Fig. 21 – Zoom sur la bande ISM

#### IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les mesures effectuées sur les lampes à basse consommation ont mis en évidence un léger rayonnement transitoire à l'allumage en dessous de 1 GHz. Une fois la lampe allumée, il n'y a presque aucun rayonnement au dessus de 160 MHz,

cependant, on a décelé un léger rayonnement vers 30 MHz. Les niveaux observés restent cependant nettement inférieurs aux limites proposées par les normes CISPR (en ramenant à 1 mètre) ou ICNIRP (plus de 100 dB de marge). Il faut cependant noter que nous n'avons pas procédé à un grand nombre de mesures et que le caractère statistique des résultats présentés reste à étudier. Lors des analyses en phase d'allumage, nous avons pu constater la présence de bruits impulsifs répartis en plusieurs rafales durant les quelques secondes qui suivent l'allumage du tube. Ces impulsions balayaient un spectre de fréquences plus large et étaient d'un niveau plus élevé que ceux repérés avec le LNA et à une distance plus petite pour les lampes basse-consommation. Le niveau de champ relevé à proximité d'un four à micro-ondes, bien qu'occupant un spectre de fréquences plus restreint et plus haut (l'ensemble de la bande ISM entre 2,4 et 2,5 GHz), est beaucoup plus important que celui généré par une lampe basse consommation. Les niveaux de champ relevés en présence d'un ordinateur portable en fonctionnement à 1 m sont du même ordre de grandeur que ceux relevés aux abords d'une lampe basse consommation, même si le spectre de fréquence des ordinateurs est plus haut (il peut atteindre 2,5 GHz). Avec la miniaturisation de systèmes de communications, la caractérisation de l'environnement électromagnétique en milieu domestique revêt une grande importance pour l'étude des problèmes de CEM qui ne manqueront pas d'apparaître, comme le montre déjà le conflit GPS et ordinateurs [4]. Les modèles découlant de ces travaux vont dans le sens de ces futures études.

#### RÉFÉRENCES

- [1] J.-B. Clause, R. Razafferson, M. Terré, A. Zeddami, "Characterisation of the radio-electric noise due to the lighting of fluorescent tubes", European Wireless 2007, Paris, Avril 2007
- [2] J.-B. Clause, R. Razafferson, M. Terré, A. Zeddami, "Characterisation and impact of the microwave ovens over a Wi-Fi system", EMC Workshop, Paris, Juin 2007
- [3] M. Terré, J.-B. Clause, "Mesures de quelques rayonnements électromagnétiques dans la bande de 100 MHz à 10 GHz", 1<sup>ères</sup> rencontres scientifiques Santé et Radiofréquences, octobre 2007
- [4] P. Stenumgaard, L. Pääjärvi and K. Fors, "Radiated emission from personal computers – A safety risk for GPS receivers?", EMC Workshop, Paris, Juin 2007
- [5] CISPR-22 –am2 {Ed 5.0}  
<http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwww.p?wwwlang=E&wwwprog=cat-det.p&progdb=db1&wartnum=035636>.
- [6] ECC Report 24, may 2003.  
<http://www.ero.dk/documentation/docs/doc98/official/pdf/ECCREP024.PDF>.