



Décembre 2006

Départements
Electromagnétisme et Télécoms.
Plate-forme Télécommunications

Etude « RLAN et Champs électromagnétiques » :

synthèse des études conduites par Supélec

Etude commandée par l'Autorité de Régulation des Communications électroniques et des Postes

Editorial

Les différents rapports sur la problématique « fréquences et santé », publiés en France à la demande du ministère en charge de la santé (rapport « Zmirou », 1^{er} rapport AFSSET (2003), 2^{ème} rapport AFSSET (2005), rapport OPECST), insistent sur la nécessité d'étudier les effets sur la santé lors de l'introduction de toute nouvelle technologie radioélectrique.

Un développement important a été constaté ces derniers mois dans l'utilisation des réseaux locaux radioélectriques (RLAN), dans leur application première de réseau indépendant ou privatif, mais également et surtout dans leur application de raccordement, sans fil et à haut débit, avec les réseaux ouverts au public.

Sur un plan réglementaire, selon la directive 1999/5/CE dite R&TTE, il est de la responsabilité des constructeurs -puis des installateurs éventuels- d'informer les utilisateurs ou les opérateurs des conditions d'utilisation et de mise en œuvre des matériels afin que ceux-ci respectent les exigences essentielles. Parmi ces exigences essentielles figurent notamment celle relative à la santé et à la sécurité de toute personne et en particulier les limites fixées par le décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 relatif à l'exposition du public aux champs électromagnétiques.

L'ARCEP, qui définit les conditions d'utilisation des équipements radioélectriques constituant les RLAN, à travers la publication des interfaces radioélectriques réglementées correspondantes, a souhaité disposer d'informations concernant la situation pratique, notamment des hot spots, vis à vis de la réglementation relative à la protection de la santé.

Ceci a rendu nécessaire une évaluation des champs électromagnétiques générés par les matériels RLAN principalement à la norme WiFi, respectant la réglementation radioélectrique des RLAN, afin de les situer par rapport aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques définies dans le décret de mai 2002.

A cette fin, l'ARCEP a fait réaliser par l'Ecole Supérieure d'Electricité (Supélec) une étude destinée à évaluer les niveaux des champs électromagnétiques produits par les réseaux radioélectriques (RLAN) fonctionnant à 2,45 GHz.

L'étude constituée de deux phases avait pour objet de dresser un état –non exhaustif- des champs électromagnétiques produits à proximité, tant par les points d'accès que par les équipements terminaux. L'étude prend en compte les puissances maximales autorisées par la réglementation radioélectrique définie dans les décisions correspondantes de l'ARCEP pour la bande de fréquences considérée.

Dans une première phase, l'étude a porté sur des distances supérieures à la longueur de l'onde radioélectrique à 2,4 GHz (12,5 cm), pour lesquelles le respect des restrictions de base (limites de débit d'absorption spécifique, DAS) peut se vérifier par le respect de valeurs de référence à savoir des niveaux de champ électrique, plus faciles à mesurer et à simuler. Les simulations, basées sur une formule simple de propagation du champ électrique en espace libre, ont permis de simuler des environnements typiques de RLAN tels que : amphithéâtre, bibliothèque, bureaux, cafétéria, salle de cours... Les calculs de simulation ont été effectués de façon à toujours donner une valeur maximisée par rapport à ce qui serait mesuré dans un cas réel. Des mesures in situ du champ électrique sur les mêmes lieux ont permis par comparaison de valider cette marge entre les valeurs calculées et celles mesurées.

Dans une deuxième phase, l'étude a porté sur des distances inférieures à la longueur de l'onde radioélectrique à 2,4 GHz (12,5 cm) pour lesquelles le respect des restrictions de base nécessite des mesures directes du débit d'absorption spécifique (DAS). Les cas étudiés sont ceux d'utilisations spécifiques, caractérisés par une faible distance entre l'utilisateur et l'antenne, tels que celui d'un utilisateur transférant des fichiers à haut débit de son micro-ordinateur portable, posé sur une table ou sur ses genoux, vers un autre micro-ordinateur via un point d'accès distant.

Dans un souci de transparence et d'information ouverte, l'ARCEP a décidé de rendre publique cette étude. La méthodologie utilisée et les résultats obtenus sont de la seule responsabilité de Supélec et n'engagent pas l'Autorité.

Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant à faire part de leurs commentaires à l'Autorité.

Conclusions

Conclusion générale : Pour des conditions d'utilisation conformes à la réglementation radioélectrique des RLAN, les valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques définies dans le décret n° 2002-775 sont respectées pour tous les cas d'utilisation de matériels RLAN mesurés ou simulés dans le cadre de l'étude.

Quelques ordres de grandeur de mesures de débit d'absorption spécifique, en deçà de la distance de 12,5 cm :

- dans des conditions d'utilisation spécifiques -matériel posé sur les genoux de l'utilisateur par exemple-, les mesures effectuées sur 8 équipements de modèles différents se sont toutes révélées inférieures à la restriction de base (DAS) du décret du 3 mai 2002 ;
- l'ensemble des résultats des mesures effectuées sont inférieurs ou égaux à 0,2 W/kg soit 10 fois moins que la limite autorisée pour la tête ou le tronc.

Quelques ordres de grandeur de mesures de niveau de champ électrique, au delà de la distance de 12,5 cm :

- dans tous les cas, mesurés ou simulés dans le cadre de l'étude, la valeur limite du décret 2002-775, 61 V/m à la fréquence 2,4 GHz, est respectée ;
- dans le pire cas simulé, à savoir pour une distance de 12,5 cm et une puissance PIRE de 100 mW, le niveau du champ est de l'ordre de 23 % de la valeur limite du décret ;
- pour une utilisation typique avec une puissance nominale PIRE de 50 mW, au delà de 20 cm, les niveaux se situent à environ 6 V/m soit 10 % de la valeur limite du décret ;
- au-delà de quelques mètres la contribution d'un équipement WiFi devient négligeable et il est très difficile de la distinguer dans le bruit ambiant ;
- la décroissance rapide entraîne qu'en utilisation normale, avec une distance de l'ordre de 1 m entre chaque antenne de portable, il n'y a pas d'effet cumulatif : seule compte l'exposition de l'utilisateur au champ généré par son propre équipement radio.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	5
OBJET.....	6
1. DEFINITIONS ET RAPPELS.....	9
<i>1.1 Définitions.....</i>	<i>9</i>
<i>1.2 Caractéristiques des signaux RLAN IEEE 802.11b et 802.11g (WiFi).....</i>	<i>9</i>
1.2.1 Plan de fréquence.....	9
1.2.2. Caractéristiques particulières de chaque norme WiFi.....	10
1.2.3. Particularités des signaux WiFi.....	10
1.2.4. Aspects de la mesure de champ.....	18
2. SYNTHÈSE DES RESULTATS.....	20
<i>2.1. Résultats relatifs aux mesures de champ au delà de 12 cm.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2. Mesures de DAS (Débit d'absorption spécifique).....</i>	<i>21</i>
2.2.1. Protocole de mesure.....	21
2.2.2. Résultats des tests de DAS sur les cartes WiFi.....	23
3. CONCLUSION.....	27
4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	28
ANNEXE 1: EQUIPEMENTS UTILISES POUR LES MESURES DE CHAMP.....	29
ANNEXE 2: ELEMENTS DE REFLEXION POUR LIMITER L'EXPOSITION DES UTILISATEURS DE RLAN.....	30

Objet

Ce document a pour but de faire la synthèse des résultats des deux études conduites en 2003 et 2005 par Supélec à la demande de l'ARCEP sur les questions d'exposition des personnes aux champs électromagnétiques créés par les systèmes de réseaux locaux radioélectriques à 2,45 GHz généralement dénommés WiFi, dans les versions b et g de la norme IEEE 802.11.

La première étude, effectuée dans le courant de l'année 2003, a porté sur la caractérisation des champs électromagnétiques produits tant par les points d'accès que par les cartes de type PCMCIA. Les champs ont été évalués à plus de 12,5 cm (correspondant à plus d'une longueur d'onde) des sources d'émission.

En effet, on peut considérer qu'au delà de cette distance les ondes sont formées et que les lois du champ lointain correspondant aux ondes planes peuvent s'appliquer. Dans ces conditions, la vérification préalable du champ électrique est généralement suffisante a priori pour évaluer l'exposition. En se référant au décret de Mai 2002 [1] ou au texte de l'ICNIRP [2], il est possible de situer les niveaux de champ obtenus par rapport aux niveaux de référence considérés pour évaluer l'exposition du public.

A 2,45 GHz, le niveau de référence en champ électrique E est de 61 V/m ou de 10W/m² en densité surfacique de puissance. Cette valeur correspond au niveau d'environnement maximum admissible en l'absence du corps humain et garantit qu'un être biologique qui y serait exposé ne saurait être soumis à un débit d'absorption spécifique supérieur à celui spécifié comme restriction de base (grandeur fondamentale à respecter).

Il en va différemment lorsque la distance à la source d'émission est inférieure à la longueur d'onde (zone de champ proche). Dans ce cas il est important de pouvoir caractériser le débit d'absorption spécifique local (DAS ou SAR) produit au niveau de la personne exposée. Celui-ci ne doit pas dépasser 2W/kg dans la tête ou le tronc et 4W/kg dans les membres, moyenné sur un cube de 10g contigus. Ce DAS est appelé restriction de base dans les textes normatifs et réglementaires.

C'est pourquoi la seconde étude effectuée en octobre et novembre 2005 a porté sur la caractérisation du débit d'absorption spécifique induit par les systèmes RLAN, principalement les cartes de type PCMCIA et celles intégrées aux ordinateurs portables. Elle visait à compléter l'étude initiale, pour les distances entre l'utilisateur et l'antenne inférieures à 12,5 cm (champ proche) dans des configurations classiques d'utilisation d'un PC portable équipé en WiFi.

Ces études donnent une photographie instantanée des émissions produites par un échantillon de produits représentatifs du marché et prennent en compte également les puissances maximales autorisées par la réglementation radioélectrique définie dans les décisions correspondantes de l'ARCEP (ex-ART) pour les bandes de fréquences considérées. Ces décisions, n° 03-908 et 03-909 modifiant les décisions 02-1008 et 02-1009 pour la bande de fréquence à 2,4 GHz, prévoient notamment :

- à l'intérieur des bâtiments : une puissance (PIRE*) maximale de 100 mW sur toute la bande de fréquences 2400-2483,5 MHz,

- à l'extérieur des bâtiments : une puissance (PIRE*) maximale de 100 mW sur la partie 2400-2454 MHz et avec une puissance (PIRE*) maximale de 10 mW sur la partie 2454-2483 MHz.

* : Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente

Approche méthodologique

La première étude a consisté d'une part dans la définition de configurations types d'utilisation de matériels WiFi dans différents environnements tels que : pièces diverses, grand amphithéâtre de Supélec, bibliothèque, bureaux, cafétéria, salle de cours etc... .

Ces configurations ont servi à la réalisation de simulations basées sur une formule simple de propagation du champ électromagnétique en espace libre et qui est valable à des distances supérieures à environ une longueur d'onde de l'antenne et jusqu'à quelques mètres de l'antenne d'émission. Pour une puissance d'émission déterminée, le champ électrique varie alors en fonction de l'inverse de la distance à l'antenne. Cette formule a permis par ailleurs la mise au point d'un outil simple mais suffisant, permettant de simuler la plupart des environnements qui seront couramment utilisés par des RLAN dans le contexte de l'évaluation de l'exposition des personnes.

Les simulations effectuées représentent l'amplitude maximale du champ électrique généré par un ou des équipements WiFi en fonction de la distance entre l'antenne émettrice et l'antenne de réception. Les phénomènes de réflexion n'ont pas été pris en compte, en effet, dans la région proche de l'antenne (quelques longueurs d'ondes), les champs résultant des multiples réflexions contribuent peu en termes de combinaison de champ par rapport à l'onde directe lorsque le trajet source - point de mesure n'est pas occulté. On a également considéré que tous les équipements présents émettaient en même temps (ce qui n'est jamais le cas en réalité).

Le champ électromagnétique résultant est la racine carrée de la somme quadratique de tous les champs en un point donné issus des différents équipements mis en œuvre. Les calculs de simulation donnent donc toujours une valeur maximisée par rapport aux valeurs des champs effectivement rayonnés.

En complément, un grand nombre de mesures a été effectué permettant une validation du modèle utilisé en simulation.

Ces mesures visaient à évaluer les niveaux de champ électrique produits par différents équipements WiFi. Les mesures ont été effectuées hors du champ proche, à des distances supérieures à la longueur d'onde soit 12,5 cm à 2,4 GHz.

En deçà de cette distance, pour caractériser complètement le champ électromagnétique, il faudrait mesurer à la fois les champs électrique et magnétique et comparer les mesures aux deux niveaux de référence.

En fait, il a été jugé préférable, pour les faibles distances, de mesurer le débit d'absorption spécifique afin de compléter la caractérisation de l'exposition des personnes aux systèmes IEEE 802.11 b et g (WiFi).

Cela a été l'objet de la deuxième étude.

Celle-ci a consisté, à partir de différentes configurations typiques utilisées lors de la première phase, à caractériser les débits d'absorption spécifique (DAS) causés par des cartes WiFi associées à des micro-ordinateurs portables. Il a été notamment pris en compte le cas d'un utilisateur transférant des fichiers à haut débit de son micro-ordinateur portable, posé sur une table ou sur ses genoux, vers un autre micro-ordinateur via un point d'accès distant (mode infrastructure, le plus couramment utilisé).

Il faut au préalable noter que la méthodologie de mesure du DAS n'est pas complètement normalisée pour une utilisation des équipements RLAN notamment quand ils sont posés sur les genoux mais aussi au plan des modes de communication possibles, des types de données échangées, ainsi que du contrôle des données et des débits.

Supélec a donc défini et mis au point une méthode de mesure de DAS fondée sur le projet de norme CEI 62209-2 et a associé des outils de transfert de données spécifiques pour figer les conditions de transmission de WiFi, conditions critiques pour l'évaluation de l'émission radiofréquence et donc de l'exposition.

La méthode choisie garantit ainsi une bonne reproductibilité des mesures effectuées. Les outils utilisés pourraient, si nécessaire, dans l'attente d'une normalisation internationale, servir de base pour la réalisation de mesures de vérification du DAS de systèmes RLAN. Ils pourront aussi et surtout faire l'objet de publications techniques ou scientifiques en vue de contributions à la normalisation dans le domaine.

Les signaux WiFi sont complexes, ceci est lié aux aspects statistiques et aux options du protocole d'échange des données utilisé par WiFi. Ces signaux ne sont pas stables dans le temps, ce qu'on avait déjà pu constater dans l'étude précédente par les analyses effectuées dans le domaine temporel.

La procédure de mesure spécifique mise au point visait à estimer le rayonnement à distance quasi nulle qui pourrait constituer le cas pire de rayonnement. Le choix d'expérimentation retenu est celui -répandu- de l'utilisation d'un équipement PC portable sur les genoux de quelqu'un qui transfère des données ou des fichiers à partir de son PC vers un autre PC en mode infrastructure avec un point d'accès suffisamment éloigné pour ne pas perturber la mesure du DAS (ou la mesure du champ E dans l'air selon le cas étudié) créé par l'équipement WiFi du PC.

En ce qui concerne la question du raccordement de la mesure du DAS avec celle du champ électrique E dans l'air, des simulations électromagnétiques ont montré une différence de répartition des champs dans l'air et dans le liquide simulant le corps humain. Il n'est donc pas possible de relier, simplement, la valeur du DAS à celle du champ électrique externe sans le corps exposé, en effet, la mesure du DAS prend en compte le champ électrique à l'intérieur du corps biologique.

Or, le changement brusque de milieu implique une discontinuité des niveaux de champ entre l'air et le milieu biologique dont les caractéristiques de conductivité et de permittivité sont très différentes de celles de l'air.

1. Définitions et rappels

1.1 Définitions

PIRE : Puissance isotrope rayonnée équivalente - Produit de la puissance à l'accès antenne par le gain maximum numérique de l'antenne par rapport à l'antenne isotrope. La PIRE s'exprime en watts.
 $PIRE = P_e \times G_e$

DSSS : (Direct Sequence Spread Spectrum) technique d'étalement par utilisation d'une séquence pseudo-aléatoire utilisée dans la version b de la norme IEEE802.11 (WiFi)

OFDM : (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique de modulation multi-porteuse utilisée dans la version g de la norme IEEE802.11

CSMA/CA : (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) nom du protocole d'accès au support radio utilisé par les systèmes WiFi

MAC : Medium Access Control (technique de contrôle d'accès à la ressource radio)

1.2 Caractéristiques des signaux RLAN IEEE 802.11b et 802.11g (WiFi)

1.2.1 Plan de fréquence

Numéro du canal	Fréquence Américaine (FCC) (GHz)	Fréquence Européenne (CEPT) (GHz)	Fréquence JAPON (GHz)
1	2,412	2,412	2,412
2	2,417	2,417	2,417
3	2,422	2,422	2,422
4	2,427	2,427	2,427
5	2,432	2,432	2,432
6	2,437	2,437	2,437
7	2,442	2,442	2,442
8	2,447	2,447	2,447
9	2,452	2,452	2,452
10	2,457	2,457	2,457
11	2,462	2,462	2,462
12	Interdit	2,467	2,467
13	Interdit	2,472	2,472
14	Interdit	Interdit	2,484

Tableau 1 : Canalisation de la bande à 2,45 GHz

1.2.2. Caractéristiques particulières de chaque norme WiFi

Norme	Bande de fréquence (MHz)	Débit théorique (Mbit/s)	Couche physique et Contrôle d'accès
IEEE 802.11b	2400-2483,5	11	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)
IEEE 802.11a	5150 – 5350	54	OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), CSMA/CA
IEEE 802.11g	2400-2483,5	54	OFDM, CSMA/CA

Tableau 2 : Principales versions de la norme IEEE 802.11

1.2.3. Particularités des signaux WiFi

Une émission WiFi ne se produit à partir d'un ordinateur portable que dans des circonstances bien précises :

a) pour répondre à une interrogation de présence d'un point d'accès (localisation). L'émission ne dure que quelques millisecondes et ne se répète pas. La puissance moyenne de l'émission est alors négligeable.

b) pour acquitter une demande de la part du point d'accès (signal "acknowledge"). L'émission ne dure au plus que quelques centaines de microsecondes et ne se répète pas. La puissance moyenne de l'émission est aussi négligeable.

c) pour transmettre des données ou des fichiers.

Dans ces conditions, l'émission durera le temps de la transmission des données ou des fichiers sous forme de paquets ou de salves de signaux radiofréquences séparés par des temps d'attente variables ou de réponse du point d'accès.

La puissance moyenne d'émission sera alors fortement dépendante du type d'échange, du débit et de la taille des paquets d'information à transmettre.

Il faut noter que le niveau de puissance indiqué habituellement par les constructeurs, et dont la valeur maximale est fixée dans la réglementation radioélectrique, correspond à la puissance en période d'émission et non en valeur moyenne.

Or, pour les mesures de DAS, c'est la valeur de la puissance moyenne qui est utilisée.

Rappels complémentaires :

La norme IEEE 802.11 dans sa version b (WiFi) utilise la technique d'étalement de spectre par séquence directe (DSSS) et définit un gabarit ou filtre qui formate l'émission en fréquence des modules WiFi dans une bande occupée d'environ 20 MHz (fig.2 et 3).

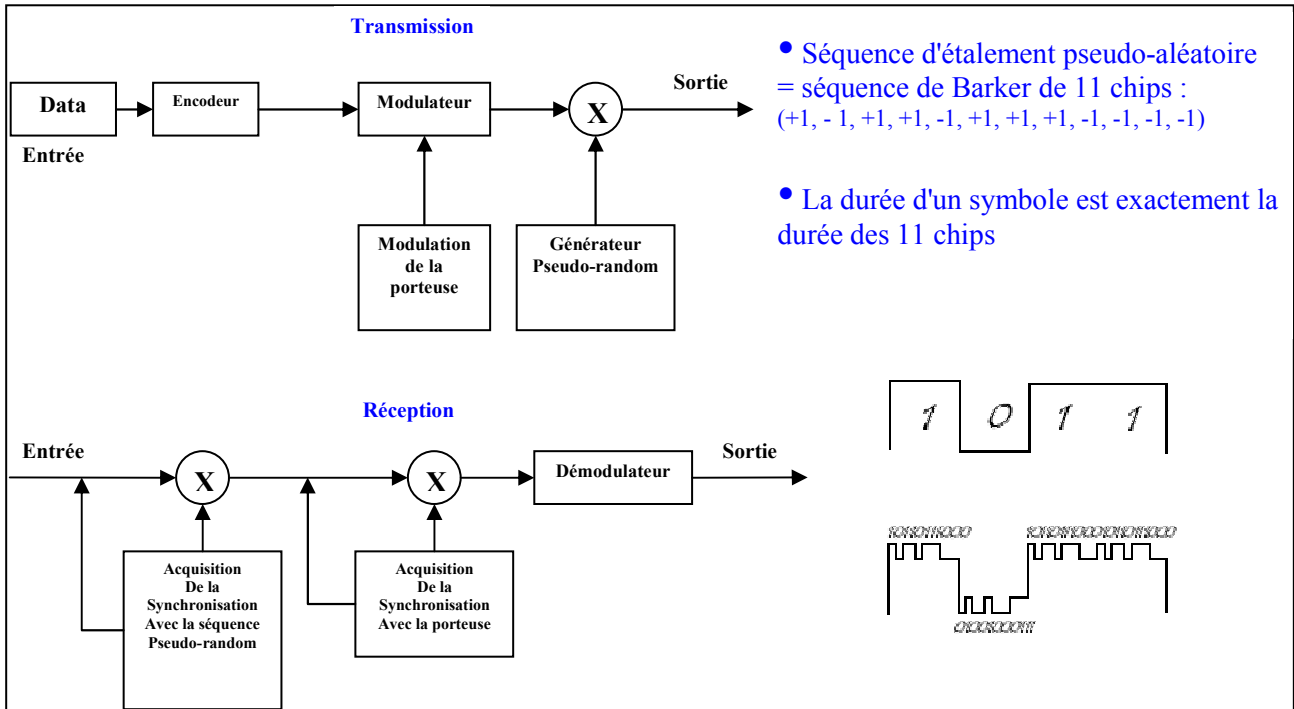


Figure 1 : L'étalement par séquence directe

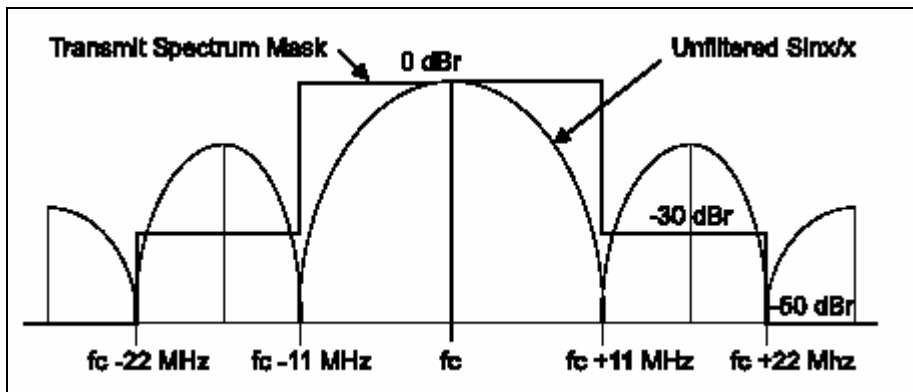


Figure 2 : Gabarit du spectre d'un signal IEEE 802.11b

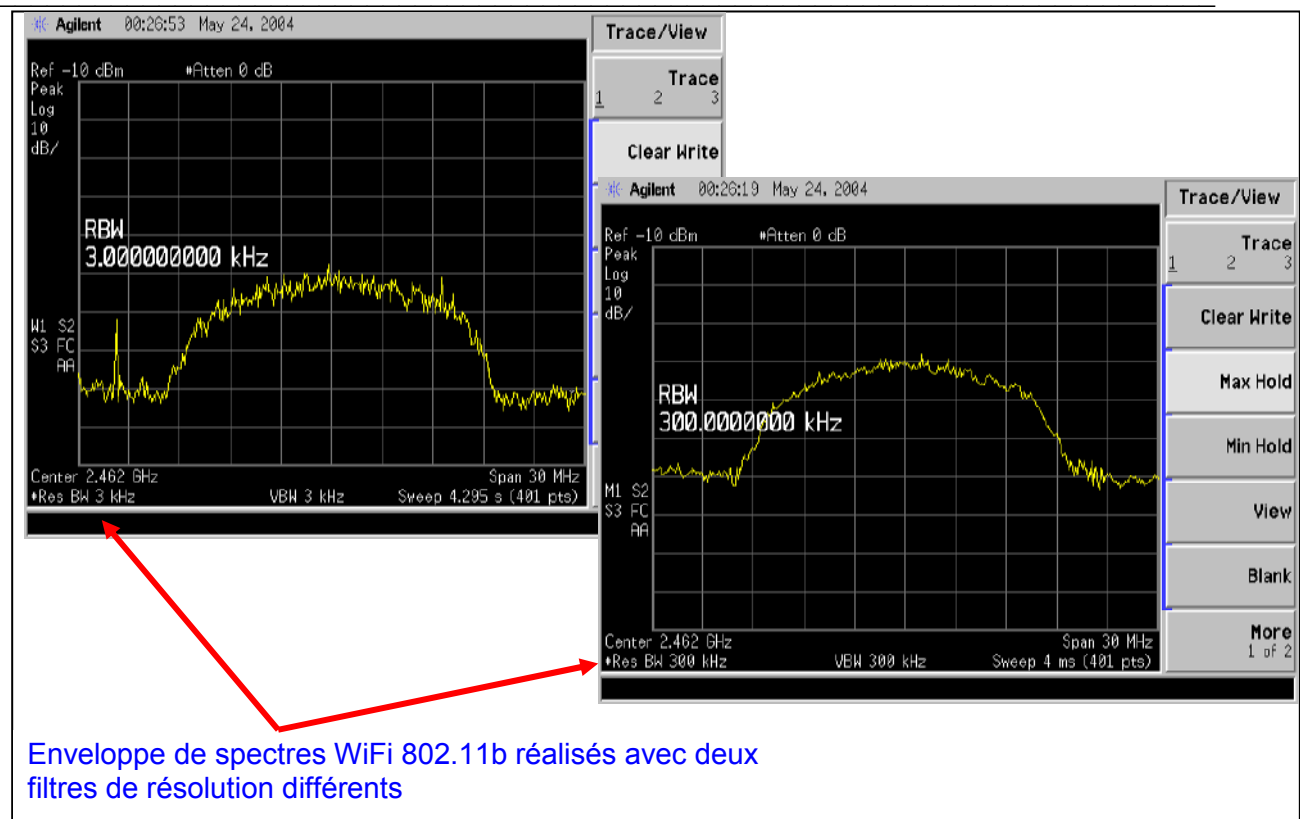


Figure 3 : Exemples de spectre WiFi (802.11b) obtenus sur un analyseur de spectre en mode « Max Hold » (maintien de la crête) avec deux filtres de résolution différents (RBW).

La norme IEEE 802.11 version g n'utilise pas la même technique d'étalement que la version b, elle utilise une modulation de type OFDM, soit 52 sous-porteuses indépendantes espacées de 300 kHz dont 48 servent au transport des données, les quatre autres servant de pilotes pour l'estimation du canal de propagation. De même que dans la version b, la norme g définit un gabarit à l'émission qui limite la bande de fréquence du spectre à environ 20 MHz (figures 7 et 8).

Autre amélioration : les normes 802.11a/g

- Modification de la couche physique 802.11
- Amélioration des débits : 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 et 54 Mbps (>108 Mbps pour des solutions propriétaires)
- Nouvelle modulation de type OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N_{BPSK})	Coded bits per OFDM symbol (N_{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

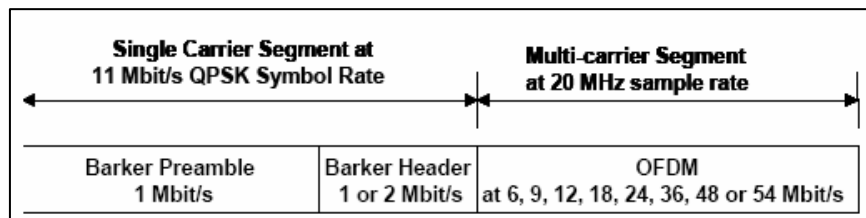


Figure 4 : Améliorations de la norme IEEE 802.11

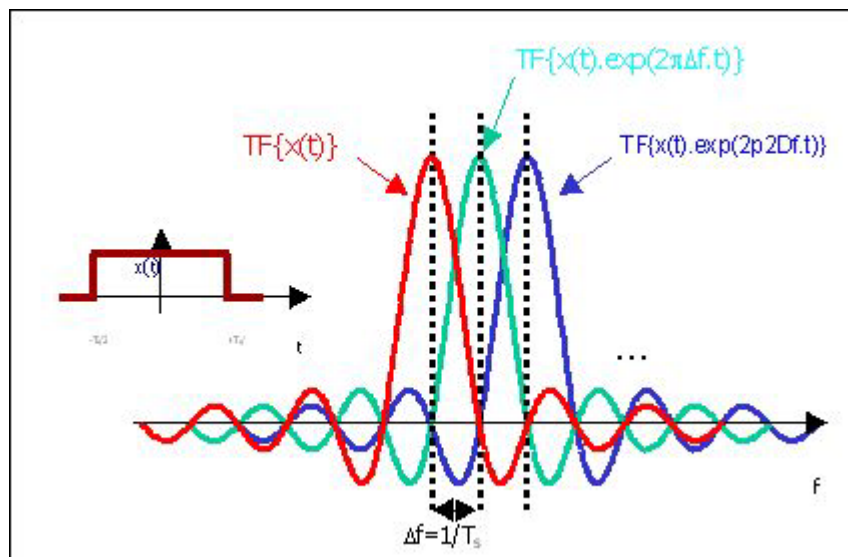


Figure 5 : Principe de la modulation OFDM

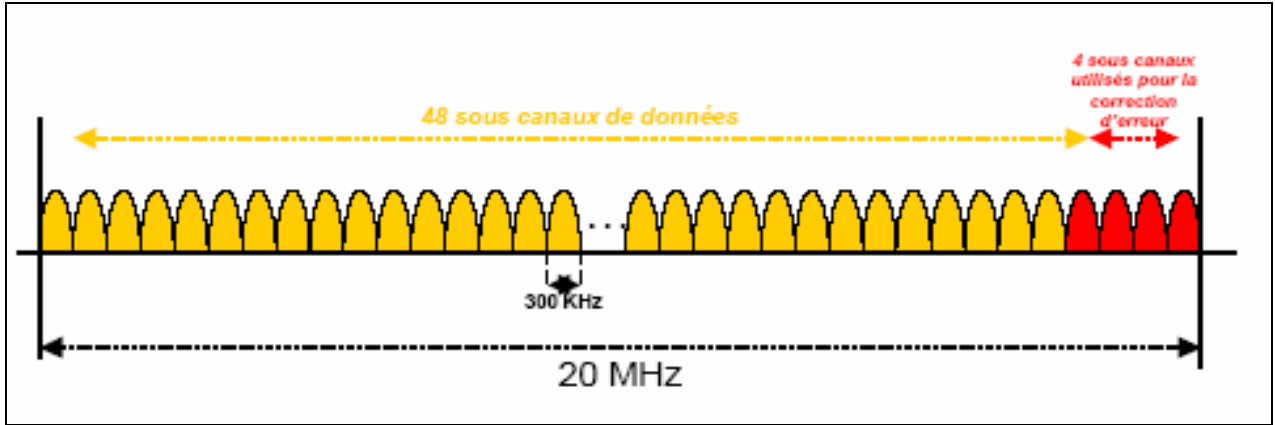


Figure 6 : 52 sous-porteuses : 48 pour les data, plus 4 pour les pilotes, espacées de 300kHz

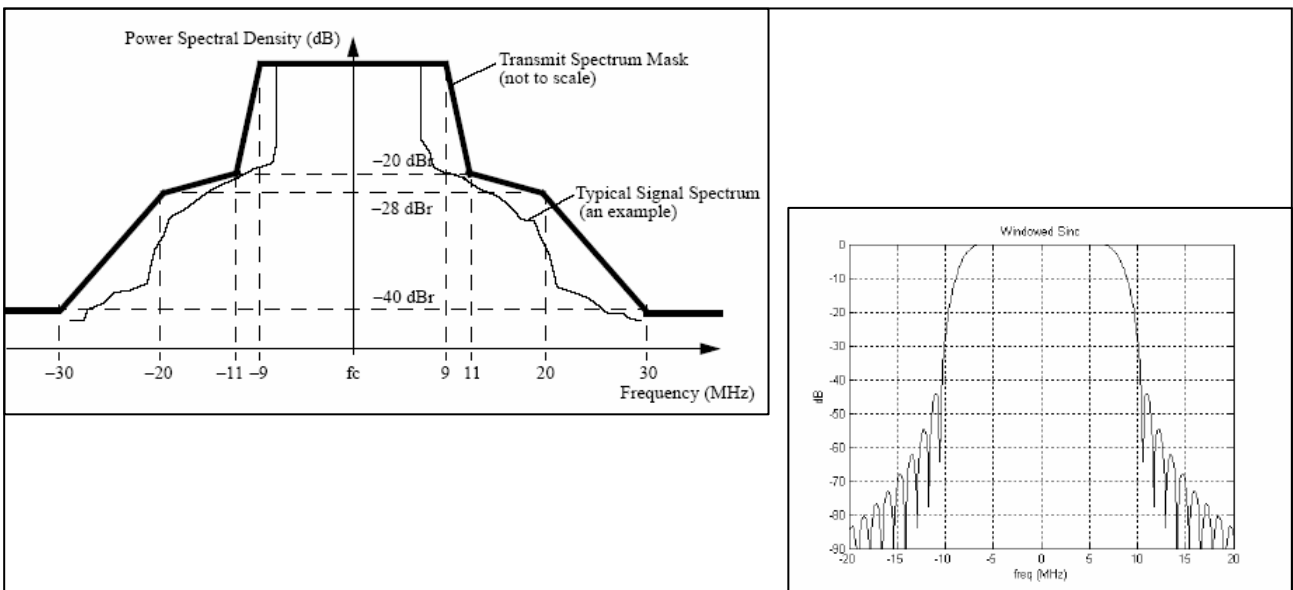


Figure 7 : Gabarit d'un spectre IEEE 802.11g

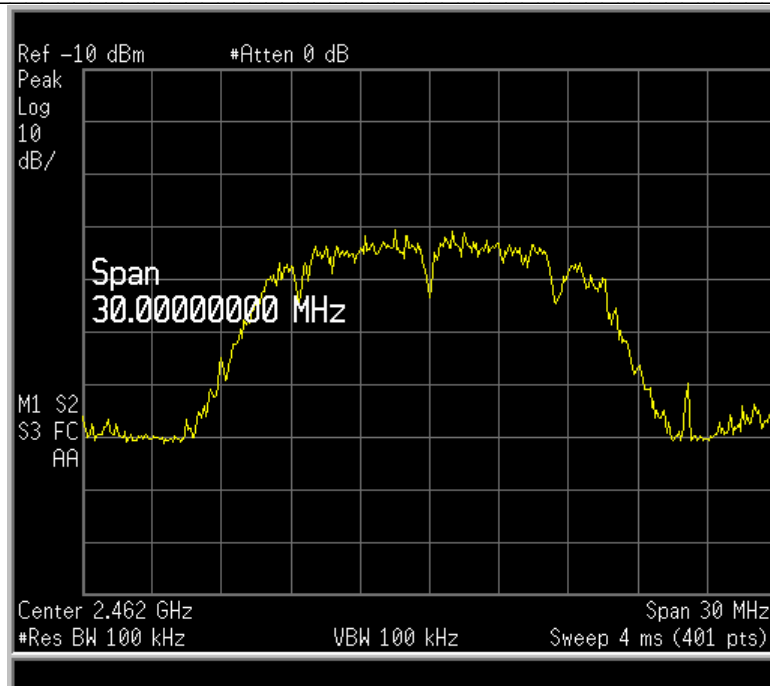


Figure 8 : Exemple d'enveloppe de spectre IEEE 802.11g obtenu avec un analyseur de spectre en mode maintien de crête (max hold)

Comme nous venons de le voir, l'enveloppe du spectre d'un système à la norme 802.11g est presque le même que celui d'un système de type 802.11b. La mesure de la puissance totale émise par un tel système nécessite une intégration dans une bande d'au moins 20 MHz compte tenu de l'occupation spectrale de l'émission WiFi.

L'aspect temporel des émissions est aussi un facteur important ; les améliorations apportées par la version g de la norme IEEE 802.11 ne concernent essentiellement que la couche physique, les couches de protocoles supérieures (par exemple MAC et LLC) ne sont que très peu modifiées. Le mécanisme qui gère l'accès à la ressource radio (CSMA/CA) est le même que pour la version b, quelques temporisations sont modifiées ainsi que le débit binaire. L'aspect temporel (paquets) des émissions est conservé (voir figures 9, 10 et 11)

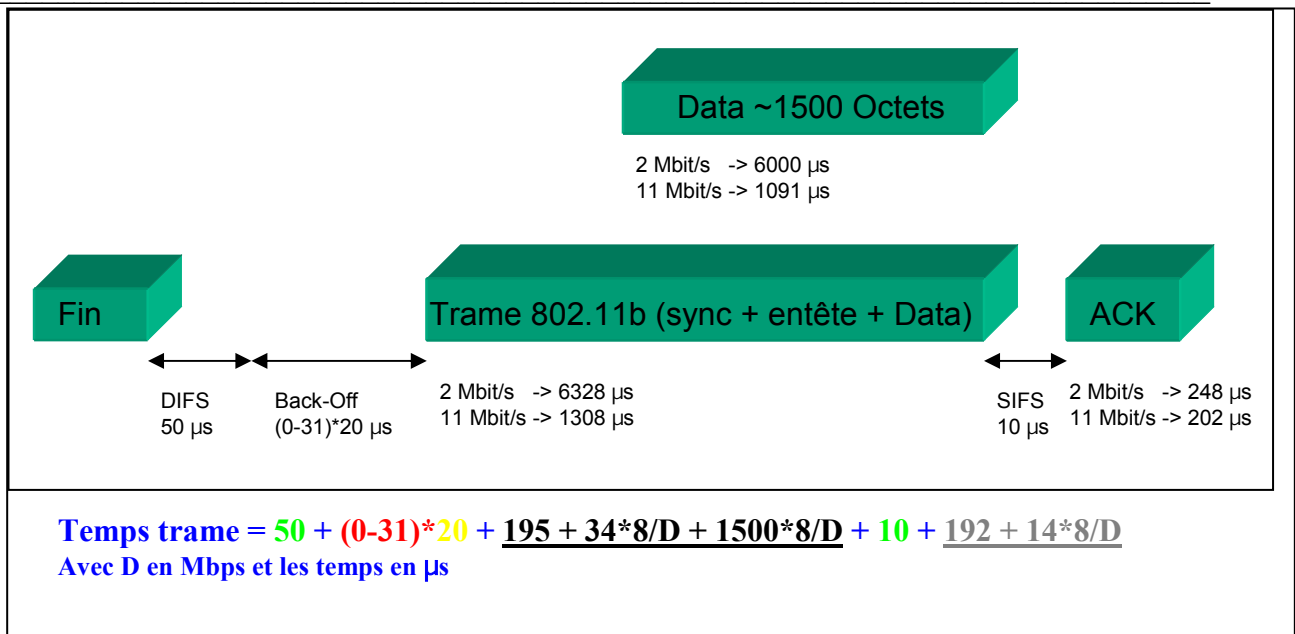


Figure 9 : Aspect temporel : protocole MAC CSMA/CA pour la version b

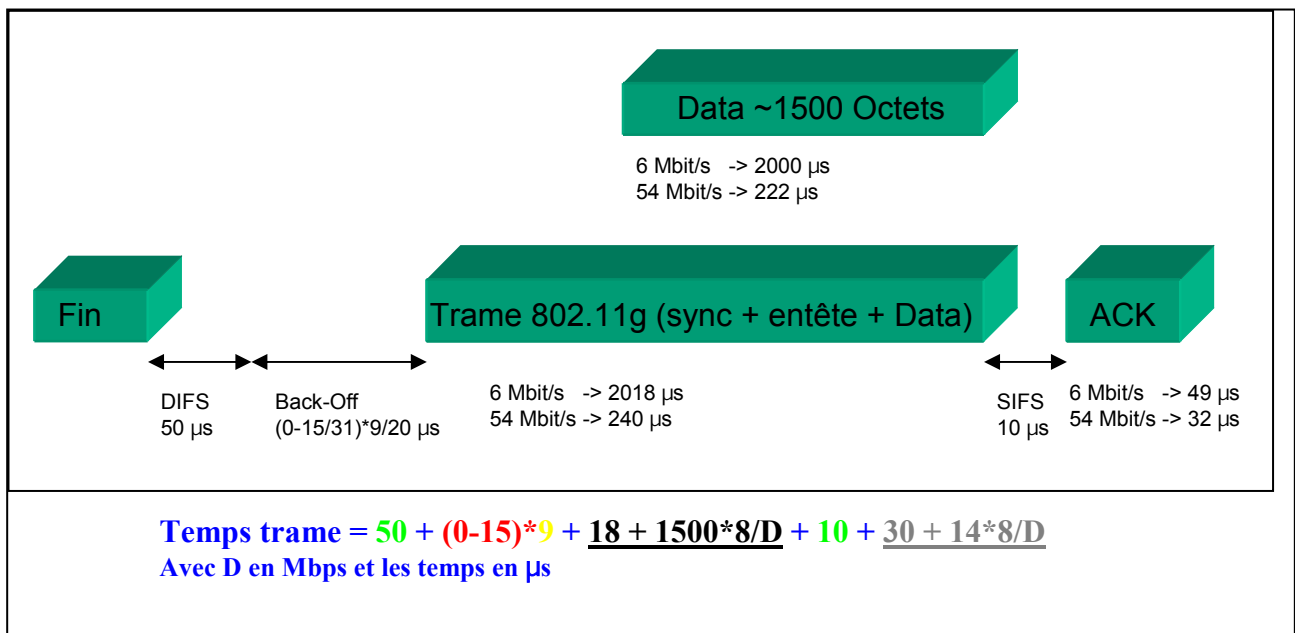


Figure 10 : Aspect temporel : protocole MAC CSMA/CA pour la version g

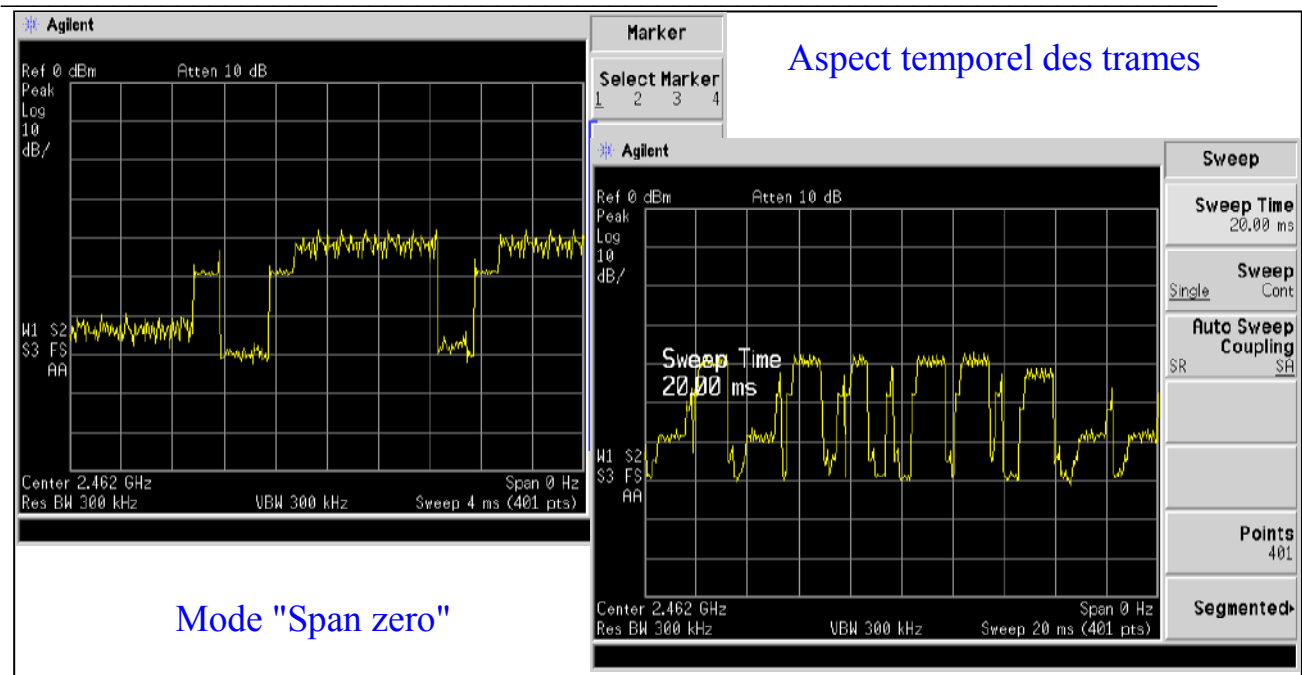


Figure 11 : Aspect temporel des émissions WiFi

La figure 11 représente les variations de la puissance radioélectrique émise par le système en fonction du temps, variations liées au protocole MAC de WiFi.

De plus, la version g est compatible avec la version b (un système g est capable d'utiliser une transmission de type b) et à n'importe quel moment une transmission utilisant le protocole g peut basculer dans le mode b (en cas de brouillage ou de diminution du niveau de signal reçu liée aux conditions de propagation).

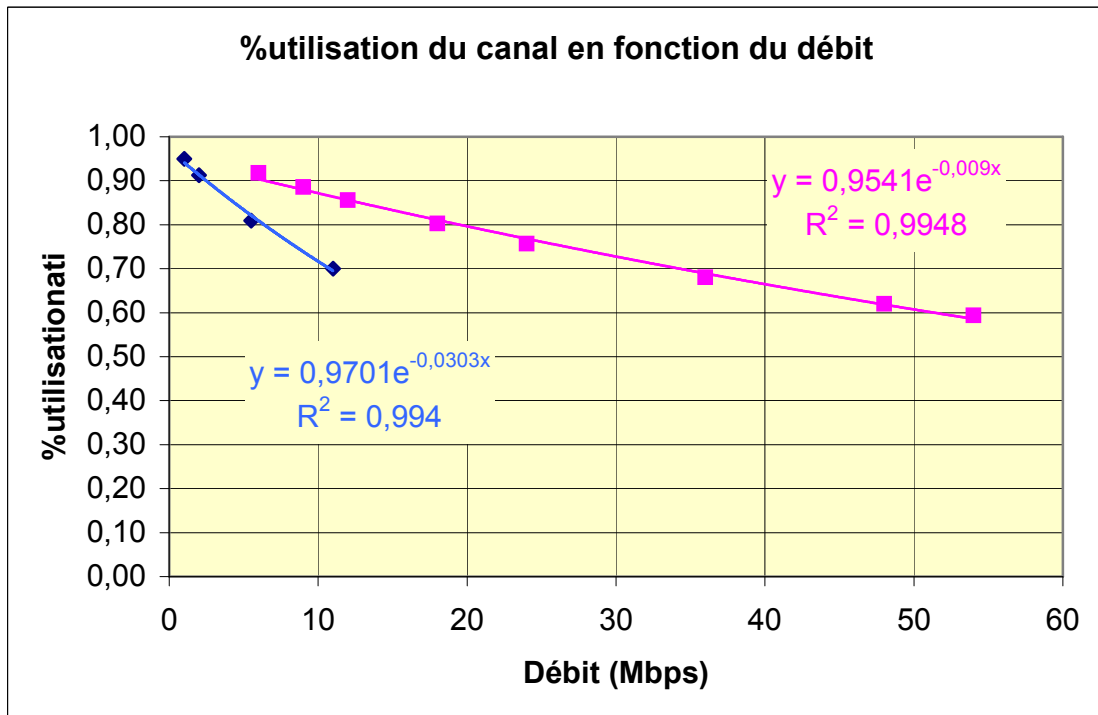


Figure 12 : Evolution du pourcentage d'utilisation du canal en fonction du type de trames utilisées (norme b courbe bleu et norme g courbe rouge)

1.2.4. Aspects de la mesure de champ

Les mesures de champ sont particulièrement délicates lorsque les signaux sont complexes avec d'une part, des variations temporelles non stables dépendant fortement des données transmises et d'autre part, des spectres de grande largeur, dépassant la largeur de bande de résolution de l'appareil de mesure.

Pour résoudre cette difficulté, il faut utiliser un mode particulier pour évaluer la puissance moyenne reçue et en déduire le champ associé. Ce mode, appelé « channel power » dans les analyseurs de spectre modernes, intègre le signal reçu dans la bande complète occupée par WiFi et permet d'en extraire la puissance moyenne pendant la période d'intégration choisie.

Si l'on souhaite obtenir la valeur de la puissance crête reçue avant de la convertir en champ crête, il faudra ajouter à la valeur obtenue en dBm en maintien de crête (max hold) sur l'analyseur de spectre, un facteur de correction $C = 10 \cdot \log_{10}(20/Bres)$ où Bres est la bande de résolution de l'analyseur de spectre en MHz.

Lors de la première étude en 2003, nous avons utilisé le mode de détection d'enveloppe avec maximisation du niveau reçu (appelé encore « Max Hold » avec un filtre de résolution de 5 MHz). Cette méthode nécessite l'application du facteur de correction C (figure 13) dépendant de l'occupation spectrale réelle du signal mesuré. Elle donne, après correction, une valeur maximum maximum du champ qui ne tient pas compte de la pondération temporelle car elle correspond à l'enveloppe des maxima.

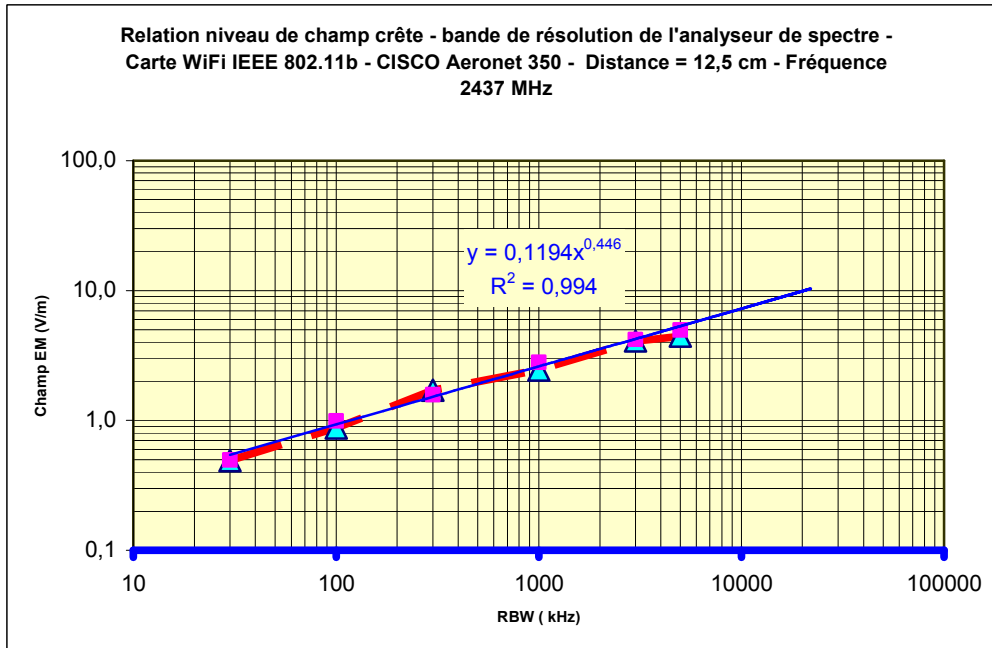


Figure 13 : Exemple de l'évolution de la valeur crête en fonction de la bande de résolution utilisée.

Pour résoudre ce problème, on utilise le mode dit "Channel power" avec intégration sur un temps suffisamment long (plusieurs secondes) pour prendre en compte la statistique temporelle du signal et obtenir une valeur efficace du niveau telle que celle retenue dans les normes relatives aux questions d'exposition des personnes.

Dans de bonnes conditions de transmission, le taux d'occupation du canal est proche de 50 %, ce qui correspond à une puissance rayonnée moitié de la puissance maximum prise en compte dans la définition de la PIRE, donc un champ efficace divisé par 1,4 par rapport à la valeur crête (mesurée en mode dit "Max Hold" avec correction de résolution)

2. Synthèse des résultats

La puissance de 100mW (PIRE) est la puissance isotrope rayonnée équivalente (efficace) pendant l'émission d'un paquet de données. Compte tenu de l'aspect non permanent de l'émission radioélectrique en WiFi (802.11b ou 802.11g), la puissance moyenne est toujours inférieure à la PIRE maximale autorisée.

2.1. Résultats relatifs aux mesures de champ au delà de 12 cm

- 1) Dans tous les cas, mesurés ou simulés, couverts par l'étude, les niveaux du décret 2002-775 [1] sont respectés pour des matériels RLAN WiFi (802.11b et 802.11g) utilisés dans des conditions conformes à la réglementation radioélectrique.
- 2) Dans le pire cas simulé, à savoir pour une distance de 12,5 cm et une puissance PIRE de 100 mW, le niveau du champ maximum est de l'ordre de 23 % de la valeur limite du décret qui est de 61 V/m et le niveau de densité surfacique de puissance correspond à moins de 5% de la valeur limite du décret.
- 3) Pour une utilisation plus réaliste de transfert de fichiers par l'ordinateur portable à débit maximum avec une puissance nominale PIRE de 50 mW, à 20 cm, les niveaux de champ sont d'environ 6 V/m soit 10 % de la valeur limite du décret en champ et à 1 % en densité surfacique de puissance de la limite du décret.
- 4) La valeur du champ électromagnétique décroît rapidement lorsque la distance à l'antenne augmente. La décroissance en environnement intérieur est proche de celle de la loi de propagation en espace libre jusqu'à quelques mètres, et dépend au delà de l'environnement.
- 5) Au-delà de quelques mètres, la contribution d'un équipement WiFi (utilisé dans les conditions nominales prescrites par le constructeur) devient négligeable en terme d'exposition (très inférieure à 0,1 V/m).
- 6) La décroissance rapide du champ entraîne qu'en utilisation normale, avec une distance de l'ordre de 1 m entre chaque antenne de micro-ordinateur portable, il n'y a pas d'effet de sommation des carrés des champs incidents : seule compte l'exposition de l'utilisateur au champ généré par son propre équipement radio.

Le tableau 3 représente les variations du champ et de la densité surfacique de puissance produits par une émission permanente de 50 mW en fonction de la distance à comparer avec les niveaux de référence de champ E de 61 V/m et de densité surfacique de puissance de 10 W/m² du décret [1].

D (cm)	E (V/m)	Dsp (W/m ²)
12	10,2	0,276
20	6,1	0,099
30	4,1	0,044
40	3,1	0,025
50	2,4	0,016
100	1,2	0,004
150	0,8	0,002
200	0,6	0,001

Tableau 3 : Variations théoriques du champ électrique et de la densité surfacique de puissance pour une émission permanente de 50 mW de PIRE.

Dans certains cas particuliers, liés tant à la configuration des matériels qu'à une utilisation a priori non recommandée de ces derniers, par exemple un équipement WiFi intégré à la carte mère d'un ordinateur portable posé directement sur les genoux ou une application prolongée de la main sur une carte PCMCIA WiFi notamment lors d'un transfert intense de données ou de fichiers, les distances réelles d'exposition peuvent se trouver être inférieures à celles qui ont été retenues dans la première partie de l'étude pour la réalisation des mesures de champ électrique.

Dans ces conditions, nous avons entrepris de vérifier le respect des valeurs limites de la restriction de base (débit d'absorption spécifique) de quelques équipements représentatifs du marché.

2.2. Mesures de DAS (Débit d'absorption spécifique)

2.2.1. Protocole de mesure

La méthode utilisée pour la mesure du DAS a consisté à établir une liaison de type « WiFi » IEEE 802.11 b ou g montante (de la carte du PC sous test vers un point d'accès) au débit maximal utile constant sur toute la durée de la mesure (cela assure une puissance moyenne émise maximale). Pour cela nous avons utilisé un PC fixe relié par câble réseau Ethernet 100Mbps au point d'accès WiFi avec le logiciel IpTraffic de la société ZTI, un point d'accès IEEE 802.11g Netgear WG602, un PC portable avec le logiciel AirMagnet pour le contrôle du flux WiFi et un PC servant de support pour les cartes de type PCMCIA sous test (HP Omnibook Xe3 N° de série : TWD04800399) également équipé du logiciel IpTraffic.

Le logiciel AirMagnet est un outil de gestion de réseau WiFi qui permet de visualiser tous les échanges de paquets IEEE802.11a/b/g et donc de vérifier que le transfert s'effectue dans de bonnes conditions (débit maximal utile égal à environ la moitié du débit maximal de la norme soit : environ 5Mb/s pour la norme b et environ 20Mb/s pour la norme g).

Le logiciel IpTraffic est une application de type client/serveur permettant de synthétiser et de contrôler un flux de données de type TCP/UDP IP sur une période « infinie » en s'affranchissant des contraintes et restrictions liées au système d'exploitation de l'ordinateur portable.

Le DAS est mesuré à l'aide du système IndexSAR SARA2 dans lequel le fantôme SAM normalisé pour les mesures de téléphones portables GSM [2] est remplacé par un fantôme plan. La méthode de mesure du DAS appliquée ici est dérivée de la pré-norme internationale IEC 62209-2 qui traite de l'exposition des personnes par des dispositifs sans fil portés au corps en particulier. Cette norme prévoit notamment des procédures de mesure concernant les ordinateurs portables équipés de moyens de communication sans-fil. La méthodologie de mesure retenue ici s'inspire donc de cette norme, en essayant toutefois d'être encore plus restrictif. Ainsi, les cartes WiFi ont été testées au contact du fantôme plan représentant le corps humain, alors que la future norme prévoit d'imposer un espace entre l'appareil sous test et le fantôme. Constitué d'une cuve isolante, le fantôme contient un liquide simulat, à la fréquence de 2,45 GHz, les propriétés électromagnétiques du corps humain.

Ces propriétés électromagnétiques sont la conductivité σ et la permittivité relative ϵ qui sont prises respectivement égales à $\sigma = 2$ et $\epsilon = 51$, conformément aux valeurs indiquées dans le document [3], dérivées des paramètres des tissus concernés, calculés à partir des équations de Cole-Cole décrites dans la référence [4]. La norme internationale IEC 62209 part 2 proposera ces valeurs, mais elle n'est encore qu'à l'état de projet.

Des cartes PCMCIA (PC Cards) ont été testées dans 3 configurations principales, correspondant à différentes orientations du PC portable par rapport à la cuve de liquide, pour déterminer quel est le maximum. En l'absence d'indications précises dans la pré-norme IEC62209-2, on a ainsi délibérément choisi de tester le plus grand nombre de configurations possible, afin de rester dans une philosophie de détermination du pire cas d'exposition. Les limites d'exposition telles que préconisées par l'ICNIRP [2] correspondent à un DAS de 2 W/kg pour la tête et le tronc, et 4 W/kg pour les membres, lorsque le DAS est moyenné dans un cube de 10g de tissus.

- Configuration « dessous » dans laquelle on mesure le DAS existant sous la carte WiFi (le dos du clavier du PC est placé contre la cuve) ;
- Configuration « devant », pour laquelle le DAS est mesuré directement contre la partie externe de la carte, placée contre la cuve ;
- Configuration « dessus », qui prend en compte le DAS mesuré au-dessus de la carte WiFi, le clavier du PC étant placé contre la cuve.

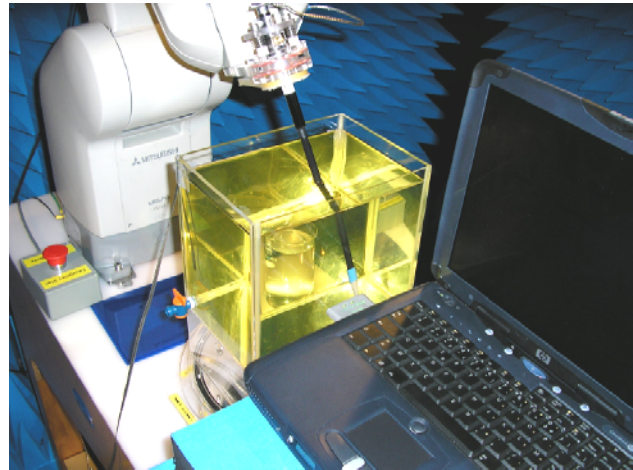
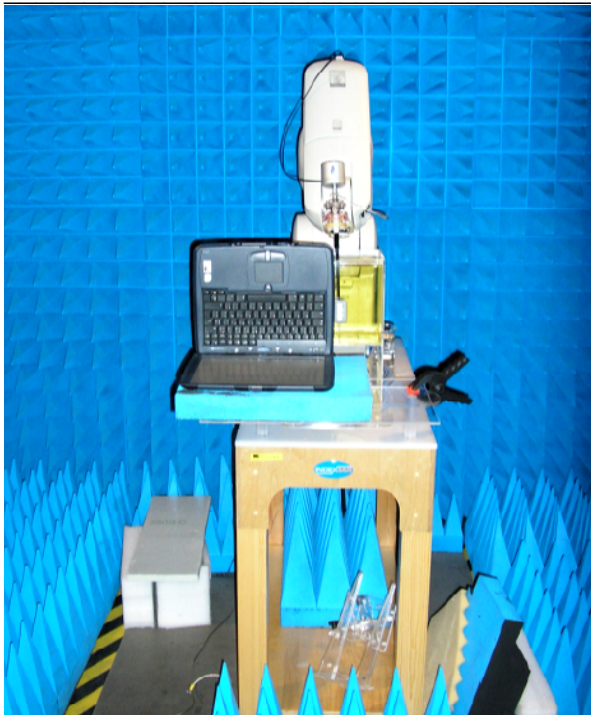


Figure 14 : PC portable équipé de la carte WiFi sous test dans deux configurations : « devant » et contre la cuve de liquide de la base SARA2

2.2.2. Résultats des tests de DAS sur les cartes WiFi

Le tableau suivant présente la synthèse des résultats de mesure de DAS obtenus pour les différentes cartes testées ainsi que le PC équipé d'une carte WiFi interne. Toutes les mesures ont été effectuées à la fréquence de 2437 MHz.

Carte	DAS max 10g (W/kg)	Configuration max	Protocole
DLink Air plus DWL-G650	0,017	Dessous	802.11g
NetGear WG511	0,192	Dessous	802.11b
Linksys WPC546	0,049	Dessous	802.11g
3Com 3CRPAG175	0,023	Dessous	802.11g
Hercules HWGPCMCIA-54	0,048	Devant	802.11g
Trend Net TEW-PC16	0,109	Devant	802.11b
Cisco Aironet Air-PCM 350 Series	0,083	Dessous	802.11b
PC Acer Aspire 1693 WLMI	0,022	Ecran haut gauche	802.11g

Tableau 4 : Valeur de DAS max 10g pour différentes cartes et PC

Mesure du DAS en fonction de la distance de la carte au fantôme

Pour deux cartes différentes, nous avons mesuré le DAS dans le fantôme en fonction de l'éloignement de l'extrémité de la carte par rapport à la cuve. A partir de 2 ou 5 cm suivant les cartes testées les valeurs mesurées ne sont plus significatives car on atteint le niveau de bruit de la mesure.

Pour la carte 1

Distance cuve-carte (mm)	Champ E max (V/m) Dans le fantôme	DAS max local (W/kg)	DAS max 10g (W/kg)
0	10,26	0,21	0,107
5	7,93	0,13	0,072
10	6,23	0,08	0,047
15	5,35	0,06	0,036
20	4,87	0,05	0,030

Tableau 5 : Variation de la valeur de DAS en fonction de la distance antenne/cuve

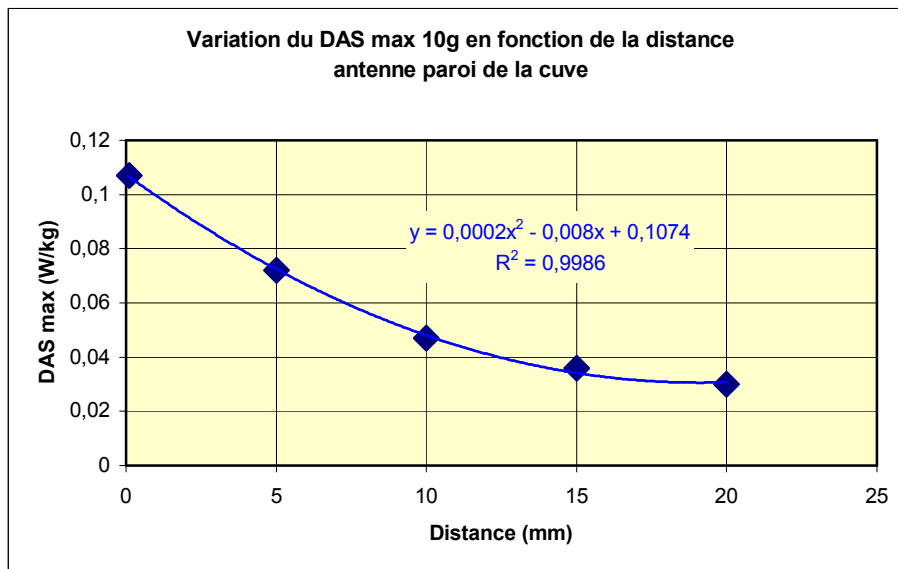


Figure 15 : Courbe obtenue pour la carte 1

Pour la carte 2

Distance cuve-carte (mm)	Champ E max (V/m) Dans le fantôme	DAS max local (W/kg)	DAS max 10g (W/kg)
0	7,78	0,12	0,044
10	4,20	0,04	0,019
20	3,07	0,02	0,012
30	2,81	0,02	0,013
40	2,96	0,02	0,011
50	2,94	0,02	0,010

Tableau 6 : Variation de la valeur de DAS en fonction de la distance antenne/cuve

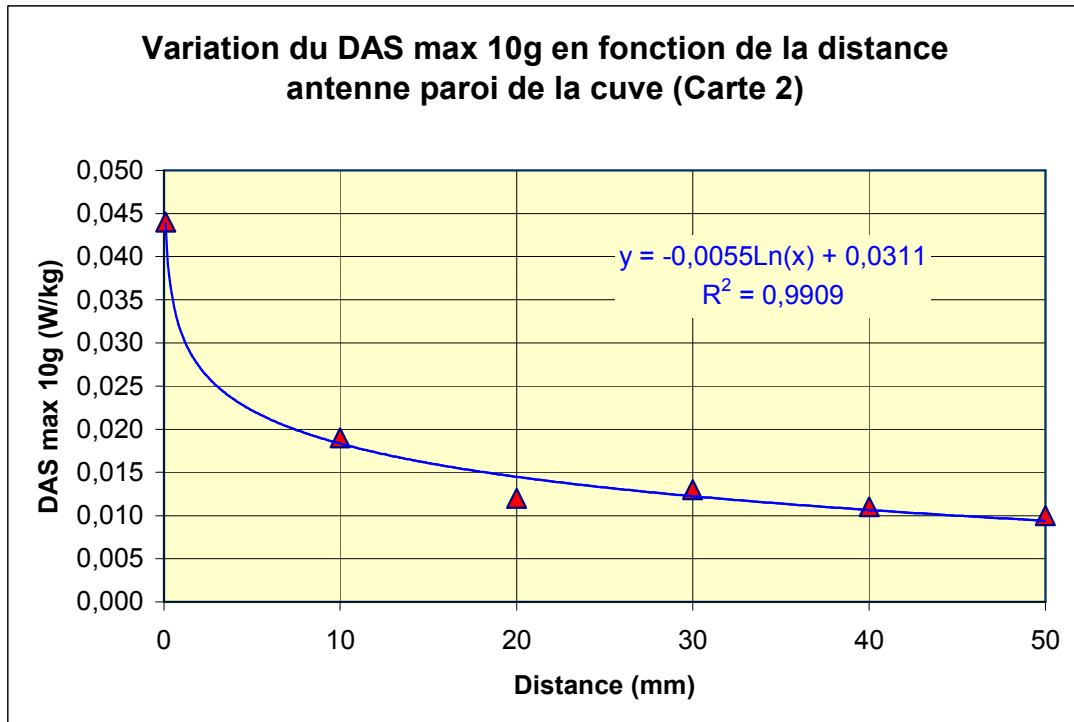


Figure 16 : Courbe obtenue pour la carte 2

On constate que même dans le cas pire, le DAS est très faible et très inférieur aux niveaux limites de la restriction de base en DAS local.

Mesure du champ dans l'air autour de cartes PCMCIA

Pour compléter l'étude, des mesures de champ électrique ont été effectuées à proximité des cartes PCMCIA pour évaluer la décroissance du champ et observer la cohérence avec les mesures de la phase n°1. On a pu observer certaines différences des résultats selon les cartes utilisées et selon les modes de fonctionnement de la carte mesurée en réseau (fig. 17a et 17b).

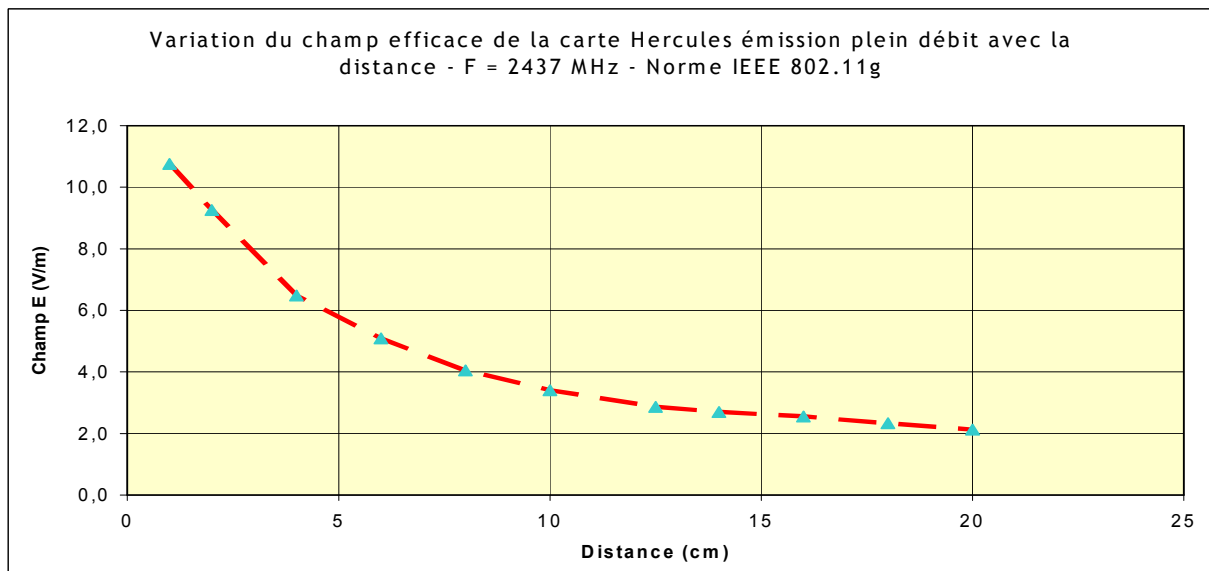
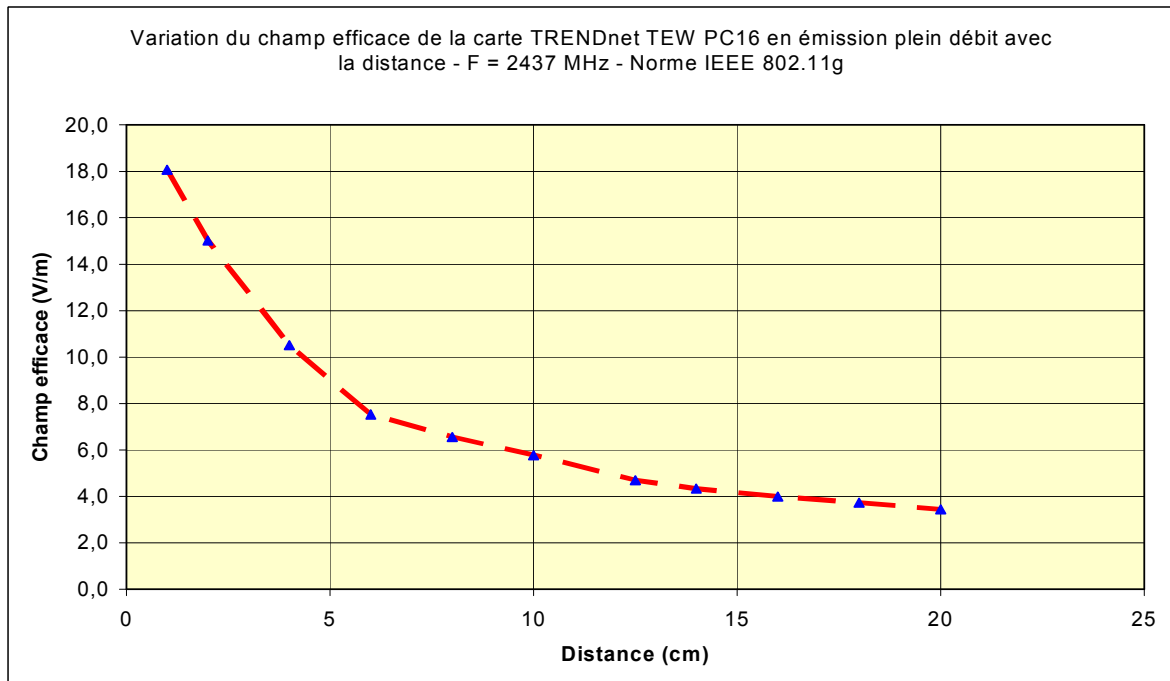


Figure 17 a et b : Courbes d'évolution du champ produit par deux cartes PCMCIA, dans l'air en fonction de l'éloignement

3. Conclusion

La présente étude sur les mesures de champ et de DAS créés par les équipements de réseaux locaux radioélectriques de type WiFi (802.11b et 802.11g) a permis de mettre en évidence -et de les résoudre- de multiples difficultés associées aux différents modes de fonctionnement de ces derniers et à leur interfonctionnement possible, ainsi qu'aux techniques de mesures spécifiques nécessaires pour mieux appréhender les questions d'exposition.

Que ce soit pour les mesures de champs électromagnétiques (niveaux de référence) ou les mesures de débit d'absorption spécifique (restrictions de base), il a fallu configurer les systèmes de façon à obtenir les modes de rayonnement maximum des cartes et des équipements testés. On a pu constater une assez grande disparité parmi les équipements (points d'accès ou cartes PCMCIA / PC Cards ou micro-ordinateurs avec WiFi intégré) au niveau des puissances d'émission -très différentes mais toujours conformes à la réglementation radioélectrique- au niveau des antennes -présentant des efficacités plus ou moins bonnes- ainsi enfin qu'au niveau des configurations de transmission qui ont nécessité l'utilisation d'un logiciel -IP Traffic- afin de mieux maîtriser les échanges de données.

Quoi qu'il en soit, ces études ont montré que tous les équipements testés respectent la restriction de base (DAS local maximum de 2 W/kg dans la tête, 4 W/kg dans les membres) du Décret du 3 mai 2002 [1] pour les équipements situés très près des utilisateurs et les niveaux de référence (61 V/m) pour les équipements qui sont utilisés à plus de 12 cm des utilisateurs comme les points d'accès.

Parmi les échantillons testés, un seul produit s'est approché de 0,2 W/kg soit 10 fois moins que la limite autorisée pour la tête ou le tronc.

Ces études ont notamment contribué à « faire avancer » la connaissance scientifique et technique de l'exposition des personnes induite par les systèmes RLANs à travers une analyse détaillée du comportement de différents modules WiFi du point de vue des protocoles, des débits de transmission et des techniques de mesures radiofréquences vis à vis de l'exposition des personnes.

Elles donnent une photographie d'un certain nombre d'équipements à un moment donné, dans des configurations d'utilisation, contrôlées grâce à des outils informatiques, et des conditions de mesures radiofréquences adaptées pour WiFi dans l'attente d'une normalisation -en cours- de la méthodologie. Elles correspondent à des situations extrêmes en termes d'exposition des personnes, en particulier lorsque le micro-ordinateur transmet des données en permanence.

Les méthodes utilisées et les résultats de ces études seront publiés dès que possible dans des revues scientifiques à comité de lecture ou feront l'objet de présentations à des colloques en vue de contribuer à la normalisation dans le domaine.

4. Références bibliographiques

- [1] - Décret n° 2002-775 du 3 mai 2002 pris en application du 12° de l'article L. 32 du code des postes et télécommunications et relatif aux valeurs limites d'exposition du public aux champs électromagnétiques émis par les équipements utilisés dans les réseaux de télécommunication ou par les installations radioélectriques
- [2] – Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, April 1998
- [3] - NF EN 50361 – Norme de base relative à la mesure du Débit d’Absorption Spécifique relatif à l’exposition des personnes aux champs électromagnétiques émis par les téléphones mobiles (300 MHz – 3 GHz) – Octobre 2001.
- [4] - FCC OET Bulletin 65 App.C - Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields - Additional Information for Evaluating Compliance of Mobile and Portable Devices with FCC Limits for Human Exposure to Radiofrequency Emissions - Supplement C (Edition 01-01) to OET Bulletin 65 -Edition 97-01) - Appendix C - page 35.
- [5] - Gabriel, C. "Compilation of the Dielectric Properties of Body Tissues at RF and Microwave Frequencies", Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037, 1996.
- [6] - Etude “Evaluation du niveau des champs électromagnétiques produits par les Réseaux locaux radioélectriques RLAN ou WLAN (WiFi)", Rapport d’étude pour l’ARCEP, Décembre 2003, révisé en 2005, Supélec, Départements Electromagnétisme et Télécommunications
- [7] - Etude « RLAN et Champs électromagnétiques » : Débit d’absorption spécifique et champs proches, Rapport d’étude pour l’ARCEP, Novembre 2005, Supélec, Départements Electromagnétisme et Télécommunications

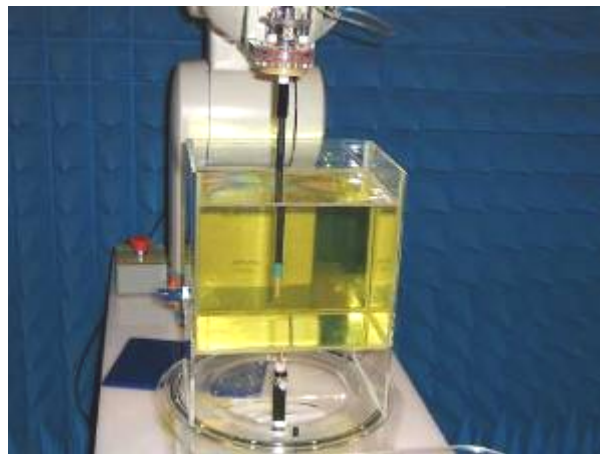
Annexe 1: Equipements utilisés pour les mesures de champ



Analyseur de spectre Agilent E 4407 B



Antenne biconique large bande ARCS



Equipement utilisé pour la mesure de Débit d'absorption spécifique

Annexe 2: Eléments de réflexion pour limiter l'exposition des utilisateurs de RLAN

Les principes suivants ont entre autres pour but d'informer les utilisateurs sur la mise en œuvre de leur installation WiFi vis à vis de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques. Ils viennent en complément des informations et règles d'utilisation que les constructeurs fournissent avec leurs produits.

Bien qu'il n'y ait aucun risque avéré lié à une exposition aux champs électromagnétiques conforme aux dispositions du décret n° 2002-775, ces informations permettront aux personnes qui le désirent de limiter toute exposition inutile tout en permettant une utilisation optimale des applications de RLAN. Elles sont formulées sous la seule responsabilité de Supélec et n'ont aucune valeur normative.

Les informations fournies par le constructeur doivent être prises en compte lors de l'installation ou de l'utilisation d'un réseau RLAN (points d'accès et équipements terminaux mobiles). Lorsque l'antenne d'un équipement est amovible et peut être remplacée par une autre, il convient de tenir compte du type ou des caractéristiques de l'antenne à utiliser mentionnés par le constructeur dans la notice d'utilisation afin de ne pas dépasser la puissance PIRE (100 mW) définie dans la réglementation radioélectrique.

Lors de l'installation des points d'accès RLAN :

- sélectionner pour chaque point d'accès l'endroit le plus approprié pour couvrir la zone choisie, c'est-à-dire choisir l'emplacement qui procure à tous les utilisateurs potentiels une connexion qui correspond à la qualité de service désirée en limitant toute exposition inutile ;
- ne pas installer plus de points d'accès qu'il n'en faut (pour des questions de brouillages réciproques) : un point d'accès est adapté pour une vingtaine de personnes. Trois points d'accès suffisent par zone de couverture (capacité surfacique maximale : 33 Mbit/s), en utilisant un plan de fréquence approprié (1/6/11, 2/7/12, 3/8/13, 5/10). Positionner les points d'accès, de préférence, en hauteur (plus haut que la hauteur de la tête : 2,10m par exemple), pour limiter l'exposition des personnes et pour augmenter le rayon de couverture.

Lors de l'utilisation :

- éviter d'approcher des objets métalliques près d'une antenne notamment d'une carte PCMCIA car les ondes électromagnétiques se réfléchissent et se réfractent comme les ondes lumineuses ce qui peut perturber la liaison et pourrait induire localement une concentration du champ électromagnétique.
- éviter de toucher de façon prolongée une antenne notamment dans le cas d'une carte PCMCIA avec une partie du corps (la main par exemple) car cela ne favorise pas la propagation des ondes (réduction des performances) et cela soumet la partie du corps à une exposition inutile, plus importante pendant la durée de l'application.