

## IMPACT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DANS L'ENVIRONNEMENT RESIDENTIEL

**Alain AZOULAY\* - Eric FOURNIER\*\***

(\*): Supélec, Dept EMG, 3 Rue Joliot Curie, 91192 Gif sur Yvette, alain.azoulay@supelec.fr

(\*\*): ANFR, 78 avenue du général de Gaulle, 94704 Maisons-Alfort, fournier@anfr.fr

**Résumé.** Ces dix dernières années, un développement technologique sans précédent s'est produit dans l'électronique en général et plus particulièrement dans le domaine de la radio aussi bien vis à vis du grand public que dans le domaine professionnel.

Le but de cet exposé est d'identifier l'évolution de l'environnement électromagnétique en milieu résidentiel et d'en analyser les conséquences sur la compatibilité électromagnétique.

### I. INTRODUCTION

Les causes principales du développement de la radio sont liées d'une part aux économies d'énergie (réaliser des produits qui consomment peu avec de bonnes performances), d'autre part à la tendance générale à la numérisation des données (tous les produits nouveaux sont des produits intégrant des systèmes ou des données numériques). De plus, on cherche à diminuer le câblage qui interconnecte les appareils. Dans ce domaine, les points critiques sont la disponibilité des fréquences utilisables ainsi que la recherche de la meilleure efficacité spectrale pour des services de qualité et de plus en plus sophistiqués, dépassant la simple radiodiffusion ou la radiocommunication de base.

Tout ceci a des conséquences en termes de compatibilité électromagnétique. D'abord, on peut noter la multiplication et la densification de nouvelles sources d'émission radioélectriques pouvant aussi créer des perturbations électromagnétiques potentielles. Ensuite, la banalisation et le grand nombre de ces systèmes font que des cas d'incompatibilité électromagnétique peuvent se produire malgré l'existence de règlements, directives et normes associés visant tous les produits mis sur le marché européen [1]. Enfin, de plus en plus d'interrogations se font jour quant aux conséquences sur la santé.

### II. IMPACT DES FREQUENCES ET DE LA COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE

#### II.1. Les fréquences

La ressource « fréquences » est une ressource limitée car la plupart des bandes de fréquences utilisables en

milieu domestique ou urbain sont déjà occupées par des services de radiocommunications ou des applications ISM (industrielles, scientifiques ou médicales).

Les nouvelles applications radioélectriques à courte portée font l'objet d'autorisations générales d'utilisation des fréquences. Le réglementeur a historiquement préféré utiliser pour ce type d'application les bandes ISM (Tableau 1), limitant ainsi l'impact sur les ressources spectrales disponibles pour les applications traditionnelles gouvernementales ou civiles (radiodiffusion, réseaux cellulaires, faisceaux hertziens, satellites ...).

C'est ainsi que Bluetooth, WiFi (IEEE 802.11 b et g), ZigBee et d'autres systèmes comme les déports vidéo se trouvent localisés dans la bande de fréquence 2400 à 2483,5 MHz qui est une bande ISM bien connue (Tableau 1), utilisée par tous les fours à microondes domestiques et de nombreuses applications industrielles de forte puissance.

Fréquence minimum	Fréquence maximum	Fréquence centrale
6765 kHz	6795 kHz	6780 kHz
13533 kHz	13567 kHz	13560 kHz
26957 kHz	27283 kHz	27120 kHz
40,66 MHz	40,70 MHz	40,68 MHz
433,05 MHz	434,79 MHz	433,92 MHz
2400 MHz	2500 MHz	2450 MHz
5725 MHz	5875 MHz	5800 MHz
24 GHz	24,25 GHz	24,125 GHz
61 GHz	61,5 GHz	61,25 GHz
122 GHz	123 GHz	122,5 GHz
244 GHz	246 GHz	245 GHz

Tableau 1 – Bandes de fréquences ISM

De la même façon, à 433 MHz, on retrouve une problématique similaire avec de nombreuses applications ISM et une bande pour les radioamateurs proche de cette fréquence.

Cette politique a parfois atteint ses limites et, de plus en plus, de nouvelles bandes de fréquences sont ouvertes pour des applications de faible portée en partage avec d'autres services, comme par exemple les RLANs avec les radars dans la bande 5 GHz ou les dispositifs de transmission audio dans la bande FM. On peut aussi noter le cas des appareils à ultra large

bande (UWB) qui intrinsèquement doivent partager avec de nombreux services. Dans tous les cas, ce partage doit faire l'objet de règles très précises pour assurer la compatibilité avec les applications prioritaires.

Le Tableau National de Répartition des Bandes de Fréquences [2] est publié par l'Agence Nationale des Fréquences et présente un état des lieux global de la situation des fréquences en France et dans les DOM/TOM, et contient une annexe sur les bandes de fréquences pour les appareils radioélectriques à courte portée. Ces bandes de fréquences sont généralement la transposition des travaux d'harmonisation européen menés par la Conférence Européenne des Postes et Télécommunications et intégrés dans le dispositif d'harmonisation communautaire.

Pour chacune de ces applications, l'Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes (ARCEP) publie des décisions d'autorisation générale. L'ARCEP a aussi mis à disposition du public son site web une base d'informations relatives à l'utilisation des fréquences avec les conditions d'autorisation pour leur utilisation.

Qu'il s'agisse du partage entre les nombreuses applications faibles portées dans une bande « sans licence » ou du partage entre une application faible portée particulière et d'autres services primaires, on s'aperçoit donc que l'on est à chaque fois confronté à la question du partage de la même bande de fréquence par des services très différents et des solutions pour éviter les brouillages mutuels.

C'est pourquoi la compatibilité électromagnétique joue un rôle fondamental avant toute mise en œuvre de nouveaux services radioélectriques dans des bandes de fréquence déjà occupées. Au plan européen, la CEPT fait préalablement de nombreuses études de compatibilité pour définir les conditions de partage qui peuvent ensuite être intégrés au dispositif d'harmonisation communautaire, et fournir la base d'une harmonisation internationale par le biais des recommandations de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT-R) voire même, dans certains cas précis, comme les RLANs à 5 GHz, être intégré dans le Règlement des Radiocommunications. Ces travaux doivent à chaque fois impliquer tous les utilisateurs du spectre concernés afin de trouver le juste équilibre entre la nécessité d'introduire de nouvelles innovations dans le spectre tout en protégeant les systèmes actuels.

## ***II.2. Enjeux de la compatibilité électromagnétique***

La compatibilité électromagnétique (tout comme la sécurité des utilisateurs) est un des points critiques de l'utilisation des fréquences. En effet, lors de la définition ou de l'autorisation d'usage de certaines bandes de fréquences, il faut s'assurer que les nouveaux services ne vont pas se brouiller entre eux,

ne vont pas brouiller ou être brouillés par des systèmes existants.

Les systèmes radioélectriques ont un accès particulièrement vulnérable, qui les distingue de tous les autres équipements électroniques, c'est l'accès de l'antenne du récepteur. En effet, l'antenne de réception permet de recevoir les signaux attendus parfois avec de très faibles niveaux incidents à la fréquence de réception.

La réception peut donc être affectée par des signaux incidents issus d'autres sources de signal à la même fréquence (ou dans le même canal) que celui attendu. On parle alors de brouillage co-fréquence ou co-canal. Ce brouillage est caractérisé soit par des grandeurs objectives (dégradation du rapport signal sur bruit, dégradation du taux d'erreur binaire, du nombre de trames erronées), soit par un indicateur global de qualité de service etc. ou alors de façon subjective, par des défauts flagrants (parasitage de communications audio, pixellisation de la vidéo sur l'écran, gel de l'image, ralentissement du débit binaire etc.).

Dans cette perspective, les études de partage de fréquence sont particulièrement critiques; en effet, lorsque deux systèmes doivent partager la même bande de fréquence, il est indispensable de s'assurer qu'ils ne se brouilleront pas mutuellement. On verra plus loin comment par la nature même des signaux émis et par les protocoles mis en place, il est possible d'éviter (autant que possible) les brouillages mutuels.

Un autre aspect à prendre en compte est la compatibilité en bandes ou en canaux adjacents . Il faut donc éviter qu'un émetteur d'un système vienne brouiller par des rayonnements "hors bande" un récepteur d'un autre système radio. D'autres signaux incidents en dehors du canal peuvent affecter le récepteur par l'accès antenne s'ils ont une amplitude élevée (notamment si la fréquence est assez proche de celle du signal utile mais en dehors du canal). On parle alors de blocage ou de désensibilisation du récepteur.

Comment se prémunir des brouillages ?

Plusieurs techniques de plus en plus sophistiquées tant au plan des modulations que des techniques d'accès ont vu le jour pour assurer à la fois des débits élevés, des services élaborés et la compatibilité radioélectrique, essentiellement pour éviter le brouillage à bande étroite co-canal.

a) Le saut de fréquence.

Le signal utile est transmis séquentiellement sur plusieurs fréquences selon un algorithme défini. Cette technique permet de s'affranchir des évanouissements de propagation en présence de trajets multiples et des brouillages sur une des fréquences de la séquence.

Le GSM a intégré cette technique (saut de fréquence lent) ainsi que Bluetooth.

b) l'étalement de spectre par les codes.

Les techniques d'étalement par les codes permettent dans une certaine mesure de s'affranchir des perturbateurs à bande étroite.

Les systèmes WiFi (IEEE 802.11b) et l'UMTS (W-CDMA) utilisent l'étalement de spectre par les codes. Tout brouilleur à bande étroite se traduit après décodage par une simple remontée du niveau de bruit répartie sur toute la bande passante du système en limite le risque de brouillage.

c) l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

L'élargissement de la bande est introduit par l'utilisation d'un grand nombre de sous-porteuses, chacune portant une partie de l'information à transmettre. L'OFDM est une technique de plus en plus populaire car elle est robuste vis à vis de la propagation avec des trajets multiples et vis à vis des brouillages à bande étroite.

d) l'ULB/UWB (bande ultra-large / Ultra Wide bande) est un cas extrême d'étalement des fréquences sur plusieurs centaines de MHz ou plusieurs GHz recouvrant plusieurs bandes de fréquence et avec un niveau de densité spectrale de puissance extrêmement faible.

Diverses techniques d'évitement des brouillages viennent compléter ce tableau.

Les fonctions de type LBT (listen before talk), DFS (dynamic frequency selection), DAA (detect and avoid) et les protocoles de type CSMA/CA permettent d'éviter des brouillages ou des collisions de signaux différents en écoutant préalablement la fréquence sur laquelle le système doit émettre afin de n'émettre que si la fréquence est libre et éventuellement de changer de fréquence.

### III. LES APPLICATIONS ACTUELLES EN ENVIRONNEMENT RESIDENTIEL

En environnement résidentiel, on peut noter l'émergence depuis quelques années des « xxx-Boxes » combinant l'ADSL haut débit à WiFi, la téléphonie domestique généralement basée sur un accès DECT, ou par voix sur IP, la téléphonie mobile avec les différents standards disponibles en Europe (GSM 900/1800, GPRS, EDGE, UMTS(3G), HSPA(3G++) etc.), la télévision numérique de Terre (TNT/DVB-T) cohabitant pour le moment avec la télévision analogique en UHF, des répéteurs de télévision basé sur une transmission à 2,45 GHz, des systèmes d'ouverture de porte de garage à 433 MHz ou à 868 MHz, de commandes de stores et autres dans les mêmes bandes de fréquences, la généralisation de l'utilisation de « badges sans contact » RFID dans diverses bandes de fréquences (125 kHz ; 13,56 MHz ; 868 MHz ; 2450 MHz) etc.

On peut dire que l'évolution de l'environnement électromagnétique résidentiel est d'abord liée à la multiplication et à la banalisation des systèmes sans fil.

#### a) le téléphone portable

Par son succès inimaginable il y a quelques années, le téléphone portable est devenu absolument

indispensable à la majorité des personnes (adultes et souvent enfants). Il intègre de plus en plus de fonctionnalités liées à de la transmission radioélectrique :

- *la téléphonie mobile de base en E-GSM (téléphonie GSM / données GPRS/EDGE), l'UMTS ou 3G (W-CDMA),*

Historiquement, le GSM a été le premier système numérique de radiocommunications cellulaires et son succès a été considérable. Il est essentiellement dédié à la voix quoique le GPRS et plus tard EDGE ont permis d'apporter une transmission de données plus confortable en attendant l'arrivée de l'UMTS. Le tableau 2 présente les différentes bandes de fréquences pour le GSM et l'UMTS.

Type de système	Emission Portable (liaison montante)	Réception portable (liaison descendante)	Puissance maximale du portable
GSM 900 & E-GSM 900	880-915 MHz	925-960 MHz	2W (250mW moyen)
GSM 1800	1710-1785 MHz	1805-1880 MHz	1 W (125 mW moyen)
UMTS	1920-1980 MHz	2110-2170 MHz	125 mW
GSM 850 USA	824-849 MHz	869-894 MHz	
GSM 1900 USA	1850- 1910 MHz	1930-1990 MHz	

Tableau 2 . Principales bandes de fréquences allouées au GSM et à l'UMTS [4].

Le GSM et l'UMTS (actuellement implémenté en Europe) ont en commun l'utilisation d'un mode duplex fréquentiel mais utilisent des techniques d'accès et de modulation très différentes. Le GSM fonctionne en TDMA ou AMRT (Accès multiple par répartition dans le temps) et fonctionne dans des canaux de 200 kHz. L'UMTS fonctionne en mode W-CDMA ou AMRC (Accès multiple par répartition par codes à large bande) avec des canaux de 5 MHz et permet des débits plus élevés que le GSM. Les évolutions de l'UMTS (Long Term Evolution, LTE) intégreront la modulation OFDM)

- *l'accès WiFi selon les différentes normes IEEE (Tableau 3 )*

Plusieurs normes américaines IEEE sont définies sous le sigle WiFi. Actuellement, c'est la version 802.11g qui est la plus populaire compte tenu des débits possibles et de la bande de fréquence allouée.

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 3. Bandes de fréquences et techniques associées aux normes IEEE 802.11a/b/g (WiFi actuel).

### - la connectivité Bluetooth

Au niveau des téléphones portables, Bluetooth assure des liaisons à très courte portée avec d'autres appareils équipés en Bluetooth ; sa première vocation était de remplacer le dispositif de communication en infra-rouge équipant les téléphones mobiles ou les PC portables. Bluetooth partage également la bande de fréquence 2400 – 2483,5 MHz avec une technique d'étalement différent de WiFi : le saut de fréquence sur 79 canaux disponibles répartis uniformément entre 2402 et 2480 MHz. Le débit peut atteindre 1 Mbit/s.

Trois classes d'émission sont définies :

- la classe 1 avec une puissance maximale de 100 mW
- la classe 2 avec une puissance maximale de 2,5 mW . C'est la plus couramment implantée dans les téléphones portables assurant une portée typique d'une dizaine de mètres.
- la classe 3 avec une puissance maximale de 1 mW.

### - le système NFC (near field communication)

La vocation du système NFC est de pouvoir utiliser son téléphone portable comme moyen de paiement par une application à très courte portée, intégrée dans le téléphone portable sur une base similaire à une technique d'identification RF (RFID) mais avec une possibilité d'échange de données plus importante qu'une simple identification. C'est une implémentation récente qui n'est pas encore très diffusée mais qui peut représenter une perspective intéressante. La bande de fréquence retenue pourrait se situer autour de 13,56 MHz.

Les autres fonctionnalités radioélectriques actuelles des téléphones portables ne concernent que la réception radioélectrique.

### - la réception FM

Certains téléphones portables intègrent un simple récepteur de radiodiffusion en modulation de fréquence dans la bande 87,5 –108 MHz.

### - le GPS (Global Positioning System)

Système de localisation par satellite, il permet une localisation du téléphone portable et fonctionne principalement à la fréquence de 1575,42 MHz . Couplé à des informations du réseau GSM, il peut offrir une grande précision de localisation.

### - le DVB-H / le DVB-SH

Ce système correspond à une évolution de la télévision numérique de terre (TNT) dédiée à la réception sur téléphone portable, cette évolution vise en particulier à économiser la batterie du téléphone portable. Le DVB-H devrait être déployé à partir de la fin de l'année 2008.

Certains téléphones récents (fig.1) sont équipés de presque toutes ces fonctionnalités.



Fig.1. Exemple d'un téléphone mobile doté de très nombreuses fonctions RF

### b) les systèmes "xxx-Boxes" ou association modem ADSL / routeur WiFi

Ces systèmes amènent en principe l'ADSL à domicile et sont systématiquement équipés en WiFi. Ils sont généralement compatibles aux différentes normes répertoriées sous le sigle WiFi, au moins aux versions b/g. (Fig.2, 3, 4).



Fig.2. Routeur WiFi (IEEE 802.11b/g/n)



Fig.3. Spectre enveloppe (max-hold) du signal d'un routeur WiFi à la norme IEEE 802.11b

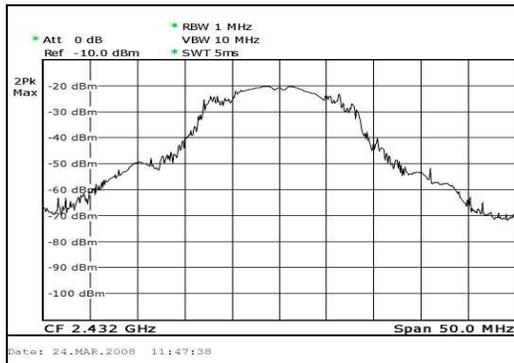


Fig.4. Spectre enveloppe d'émission du signal du même routeur en phase de transmission de données vers un appareil à la norme 802.11g.

### c) la télévision

L'émergence de la Télévision Numérique de Terre (TNT ou DVB-T) a induit plusieurs conséquences. D'une part, il faut poursuivre les émissions en télévision analogique jusqu'en 2011 tout en déployant la TNT. (Fig.5). La planification des fréquences est donc particulièrement délicate, notamment aux frontières où les besoins des pays voisins doivent aussi être pris en compte.. Des cas de brouillages TV peuvent apparaître du fait de la mauvaise protection de certains téléviseurs ou des amplificateurs large bande utilisés parfois dans les installations de réception (proximité d'antennes de stations de base GSM, de radioamateurs, de réseaux radio privés etc.)

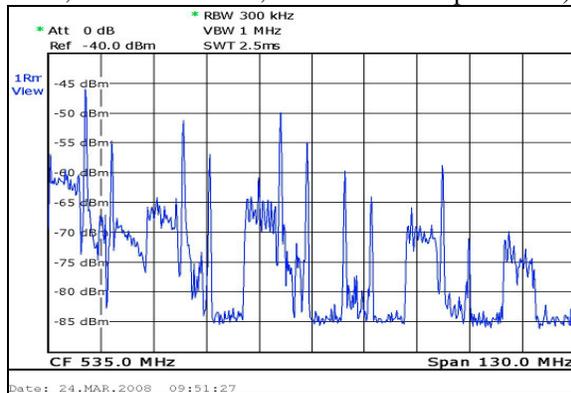


Fig.5. Cohabitation actuelle TV analogique – TNT en région parisienne

### d) le téléphone fixe sans fil (DECT)

Le DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) est un système de communication pour la téléphonie domestique sans cordon qui peut porter à plusieurs centaines de mètres. Les caractéristiques principales sont les suivantes. La bande de fréquence est de 1 880 MHz à 1 900 MHz en Europe ; d'autres bandes de fréquences peuvent être autorisées en dehors de l'Europe. L'espacement des porteuses est de 1,728 MHz. La puissance d'émission maximum en crête est de 250 mW. Le DECT fonctionne en TDD (émission et réception sur la même fréquence à tour de rôle)

La plupart des téléphones raccordés au réseau fixe de téléphonie classique ou IP sont des téléphones DECT.

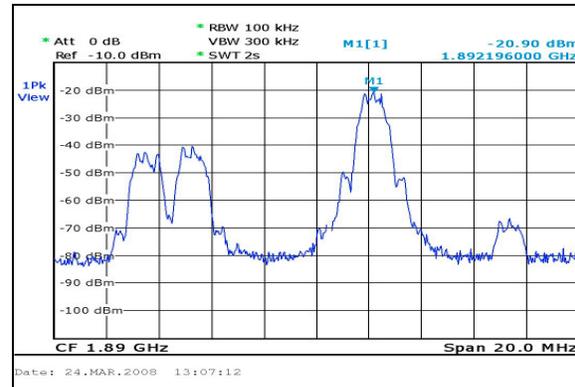


Fig.6. Spectre enveloppe de l'environnement DECT en milieu résidentiel (présence de 4 téléphones de voisins détectés).

### e) les systèmes de transmission à courte portée

Conformément à la réglementation actuelle, il existe de nombreux systèmes de transmission à courte portée et de faible puissance, disponibles pour différentes applications comme des télécommandes de portes de garage, des télécommandes de stores, des systèmes de dépôts vidéo etc. La plupart des fréquences utilisables sont situées dans des bandes « ISM » ou proches de ces bandes (433 MHz, 2450 MHz etc.) mais aussi de nouvelles fréquences autour de 868 MHz. Les systèmes ultra large bande (ULB/UWB) fournissent aussi une solution technologique pour ce type de transmission.

### f) les objets communicants

De plus en plus d'appareils (Fig.7) et pas uniquement des PC portables sont équipés de WiFi pour pouvoir accéder à Internet ou parfois même téléphoner en « Voix sur IP ». (Fig.8)



Fig.7. Objet communicant en WiFi.

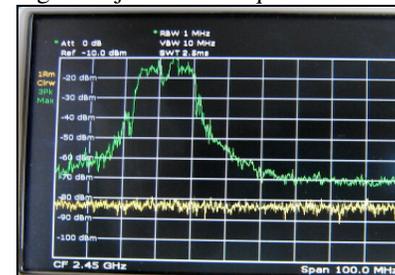


Fig.8. Enveloppe des maxima du spectre d'émission en WiFi (802.11g) d'un objet communicant

### g) les RFID

Les systèmes RFID (ou badges sans contact) se développent dans l'univers résidentiel en particulier pour les contrôles d'accès des immeubles. Plusieurs bandes de fréquences sont autorisées pour ces applications (125 kHz ; 13,56 MHz et plus récemment la bande 865 à 868 MHz).

### h) les appareils industriels ou électro-domestiques

Certains appareils électroménagers utilisent des fréquences élevées pour des applications particulières. Le plus courant est le four à micro-ondes. Ce four fait partie des appareils industriels, scientifiques ou médicaux (ISM) qui utilisent l'énergie radiofréquence à des fins autres que les télécommunications. Les fours à micro-ondes domestiques utilisent tous la bande de fréquence autour de 2450 MHz (Tableau 1) avec des puissances de chauffage (internes au four) de plusieurs centaines de watts. De ce fait, une très faible fraction de la puissance est rayonnée à l'extérieur du four pendant son fonctionnement, malgré toutes les précautions prises par les constructeurs. La puissance totale rayonnée à l'extérieur par les fours à micro-ondes est généralement de l'ordre de quelques centaines de milliwatts.

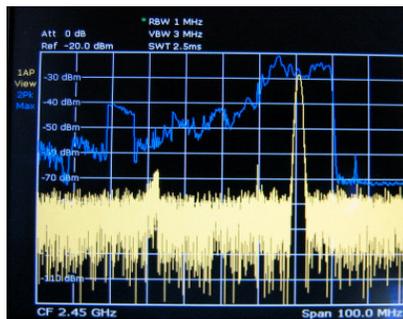


Fig.9. Spectre instantané et spectre enveloppe des maxima d'un four à micro-ondes (à 1m)

## IV. Evolution future de l'environnement électromagnétique

Plusieurs technologies émergentes vont certainement affecter l'environnement résidentiel dans un futur proche. On considère actuellement de nombreuses évolutions des systèmes par intégration de nouvelles capacités de transmission radioélectrique (« internet des objets »), transformation des « xxx-boxes » en intégrant des femto-stations de base de téléphonie cellulaire, la télévision sur mobile DVB-H/DVB-SH, l'Ultra Large Bande (UWB), plus tard le Wimax mobile et le système LTE (Long Term Evolution) viendront certainement compléter le panorama florissant des systèmes de communications radioélectriques qu'ils soient à courte portée ou en communications cellulaires à haut débit. Les applications en ondes millimétriques vers les 60 GHz

sont aussi susceptibles de se développer pour des applications en intérieur, résidentielles ou de bureau. Ceci permet de préfigurer la perspective de radio « intelligente » auto programmable en fonction des services et bandes de fréquences disponibles. Elle semble commencer à arriver à travers tous ces multiples services programmables dans les téléphones portables avec toutes les techniques associées d'évitement des brouillages.

## V. Conclusion

On trouve donc un véritable foisonnement d'applications utilisant le spectre radioélectrique en environnement résidentiel et de nouvelles perspectives voient régulièrement le jour.

Pour assurer la compatibilité électromagnétique, les principales administrations concernées, les opérateurs et les centres de recherche travaillent au plan européen (CEPT / ETSI) et international (UIT-R / CEI / CISPR) en tenant compte des divers scénarios possibles et des situations de brouillages potentielles pour limiter autant que possible les risques de brouillages. Toutefois, le partage de fréquence est fondé sur l'absence de garantie de protection contre les brouillages pour ce genre d'usage. L'utilisateur résidentiel ne le sait généralement pas et en subit parfois les conséquences sans véritable recours possible.

De même, les limites des perturbations électromagnétiques produites par tous les autres types d'équipements non radioélectriques (alimentations à découpage, systèmes intégrant des microprocesseurs et des horloges rapides, ou des relais etc.) sont définies pour des distances de protection de l'ordre de 3 à 10 m au minimum et devraient tenir compte de ces nouvelles applications radioélectriques pour assurer une compatibilité à faible distance en environnement domestique.

## VI. Références

- [1]. Directive 1999/5/CE du parlement européen et du conseil du 9 mars 1999 concernant les équipements hertziens et les équipements terminaux de télécommunications et la reconnaissance mutuelle de leur conformité
- [2]. ANFR – Tableau National de répartition des bandes de fréquences (TNRBF).
- [3]. ERC Recommendation 70-03 relating to the use of short range devices (SRD). February 2008.
- [4] Norme 3GPP TS 45.005 V7.12.0 (2007-11)-3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Radio transmission and reception (Release 7)