

Liège, le 18 janvier 2012

ETUDE DU CARACTERE PULSE DES RAYONEMENTS EMIS PAR LES SYSTEMES DE TELECOMMUNICATION SANS FIL

Etude réalisée à la demande de l'IBGE

Rapport n° 172 / 2012

Benjamin VATOVEZ
Ingénieur civil physicien,
Attaché à la Cellule
Champs électromagnétiques

Willy PIRARD
Ingénieur civil en Electronique,
Responsable de la Cellule
Champs électromagnétiques

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION
2. MODULATIONS ET ONDES PULSEES
 - 2.1. But de la modulation
 - 2.2. Enveloppe d'un signal modulé
 - 2.3. Les trois modulations fondamentales
 - 2.3.1 La modulation d'amplitude
 - 2.3.2 La modulation de fréquence
 - 2.3.3. La modulation de phase
 - 2.4. Effet de la synchronisation et du multiplexage
 - 2.5. Exposition aux rayonnements de plusieurs émetteurs de même type
 - 2.6. Définition d'une onde pulsée
3. MESURES ET ANALYSES
 - 3.1. Méthode d'analyse
 - 3.2. Résultats des analyses et classification des rayonnements
 - 3.2.1. Radiodiffusion en fréquence modulée FM
 - 3.2.2. Radiodiffusion en modulation d'amplitude AM
 - 3.2.3. Télévision analogique
 - 3.2.4. Diffusion audio numérique DAB (*Digital Audio Broadcasting*)
 - 3.2.5. Télévision numérique DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*)
 - 3.2.6. Téléphonie mobile GSM et DCS 1800
 - 3.2.7. Réseau GSM-R
 - 3.2.8. Réseau TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*)
 - 3.2.9. Téléphonie mobile UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) – (3G – Variante FDD)
 - 3.2.10. Téléphonie mobile UMTS HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*)
 - 3.2.11. LTE (*Long Term Evolution*)
 - 3.2.12. Wi-Fi (IEEE 802.11)
 - 3.2.13. WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*)
 - 3.2.14. Modulation SSB (*Single-sideband*) et Process SSB
4. ANALYSE DES DOCUMENTS
 - 4.1. Courrier de Norkring à l'IBGE
 - 4.2. Rapport d'étude de l'ANPI
 - 4.3. Courrier du GOF
 - 4.4. Note au cabinet du Ministre Huytebroeck
 - 4.5. Synthèse des diverses interprétations
5. CONCLUSIONS

1. INTRODUCTION

L'étude de l'impact éventuel des ondes électromagnétiques sur la santé publique est un sujet d'inquiétudes au sein d'une partie de l'opinion publique. En particulier, la nature « pulsée » des rayonnements radiofréquences émis par des systèmes de télécommunication sans fil est parfois présentée comme un facteur de risque supplémentaire. Des experts ont d'ailleurs été entendus sur cette question, en commission, lors des travaux préparatoires à l'Ordonnance de la Région de Bruxelles-Capitale¹ relative à la protection contre les rayonnements non ionisants (ci-après « l'Ordonnance »). Remarquons toutefois que les experts n'ont pas défini ce qu'ils entendaient par « pulsé ». Il ne semble pas non plus que les critères permettant de distinguer les ondes pulsées des ondes continues aient été fixés par les organismes en charge de l'établissement des normes de télécommunications (ETSI, ITU, CEPT, IEEE,...), ni par les instances sanitaires concernées par la problématique des rayonnements non ionisants.

La présente étude s'inscrit dans le contexte de l'Ordonnance, laquelle exclut de son champ d'application « *les radiations non pulsées qui sont émises en vue de transmettre des programmes [...]* ». Elle a été réalisée à la demande de l'IBGE qui a fixé comme objectif de définir les critères servant à déterminer si une onde électromagnétique radiofréquence est pulsée ou non. De tels critères devront, bien sûr, être applicables non seulement à tout signal radiofréquence examiné dans l'étude, mais aussi à ceux susceptibles d'être émis par des sources de rayonnements qui seront opérationnelles dans un futur proche. L'analyse de ces différents signaux révèle d'ailleurs une très grande diversité qui est le fruit d'une technique en constante évolution.

Insistons sur le fait que la mission confiée par l'IBGE n'a pas pour but de se prononcer sur l'existence d'un risque spécifique dû au caractère pulsé de certains rayonnements radiofréquences. A ce sujet, le lecteur pourra se référer à l'avis publié en 2008 par le Conseil Supérieur de la Santé [CSS – avis 8194] et intitulé : « Effets biologiques potentiels des micro-ondes modulées. »

S'agissant de classer les ondes radiofréquences selon leur forme, il convient de rappeler quelques notions relatives aux transformations que subit un signal dans le but de transmettre des sons, des images ou des données. Quelques exemples illustreront les liens existant, ainsi que les distinctions qu'il y a lieu de faire entre « signaux modulés » et « signaux pulsés » selon les cas. Une définition des rayonnements pulsés basée sur ces considérations sera proposée au paragraphe 2. Les critères de classification étant définis, l'analyse, présentée au paragraphe 3, permettra de discriminer les signaux y compris dans les cas complexes.

Mentionnons également qu'un des aspects de l'étude comportait l'examen les documents suivants:

- « Analyse de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques en Région de Bruxelles-Capitale. » Rapport d'étude de l'ANPI n° DSI/EMF/003. Dossier n°20070019. Convention 531.02.937/2007 ;
- Courrier de Norkring du 21 décembre 2010 à l'intention de Bruxelles Environnement concernant le rapport de Bruxelles Environnement du 17 novembre 2010 ;
- Courrier du GOF (GSM Operator's Forum) du 11 mars 2011 à l'IBGE concernant l'exclusion des émetteurs de télévision et de radiodiffusion de l'Ordonnance ;
- Courrier de l'IBGE au Cabinet du Ministre de l'Environnement Evelyne Huytebroeck du 11 mai 2011.

¹ Ordonnance relative à la protection de l'environnement contre les éventuels effets nocifs et nuisances provoqués par les radiations non ionisantes – M.B. du 14 mars 2007.

Lors de l'analyse de ces documents exposée au paragraphe 4, il convient notamment d'expliquer les différentes interprétations du mot « pulsé » entre les auteurs, lesquelles résultent de définitions non concordantes, voire d'erreurs d'interprétation de celles-ci.

Enfin, le lecteur soucieux de connaître les résultats et conclusions de l'étude pourra se limiter à la lecture du paragraphe 5.

2. MODULATIONS ET ONDES PULSEES

2.1. But de la modulation

La sinusoïde est la forme de signal radiofréquence la plus simple qui peut être rayonné. Il est connu qu'un tel signal ne peut servir à la transmission d'informations telles que sons, images, ou données. A titre de comparaison, cela reviendrait à tenter de communiquer avec une personne en ne prononçant qu'un unique mot, toujours à la même cadence. Ainsi, lorsqu'une sinusoïde est rayonnée à une fréquence donnée, transmettre un message impose de faire varier au moins un des trois paramètres qui la caractérisent ; ces trois paramètres sont : l'amplitude, la fréquence ou la phase ; ce processus est appelé « modulation ». La sinusoïde modulée est appelée « porteuse ».

2.2. Enveloppe d'un signal modulé

L'enveloppe représente les variations de l'amplitude de la porteuse. Dans le cas d'une sinusoïde pure, l'intensité varie de manière sinusoïdale dans le temps mais sa valeur maximale (c'est-à-dire l'amplitude) reste inchangée, de sorte que l'enveloppe est en principe une droite horizontale. Lorsqu'une porteuse est modulée en amplitude, son enveloppe est l'image du signal modulant comme l'illustre la figure 1.

2.3. Les trois modulations fondamentales

On classe les modulations en trois types fondamentaux : la modulation d'amplitude, la modulation de fréquence et la modulation de phase. Dans les trois cas, le signal modulant représente l'information à transmettre (sons, images ou données).

2.3.1. La modulation d'amplitude

Elle consiste à faire varier l'amplitude de la porteuse en fonction du signal modulant comme illustré à la figure 1. Lorsque le signal modulant peut prendre n'importe quelle valeur dans un certain intervalle, elle est qualifiée d'analogique.

La radiodiffusion AM analogique (*amplitude modulation*) fait appel à une modulation de ce type. La figure 2 est le résultat de deux mesures de l'enveloppe d'un tel signal.

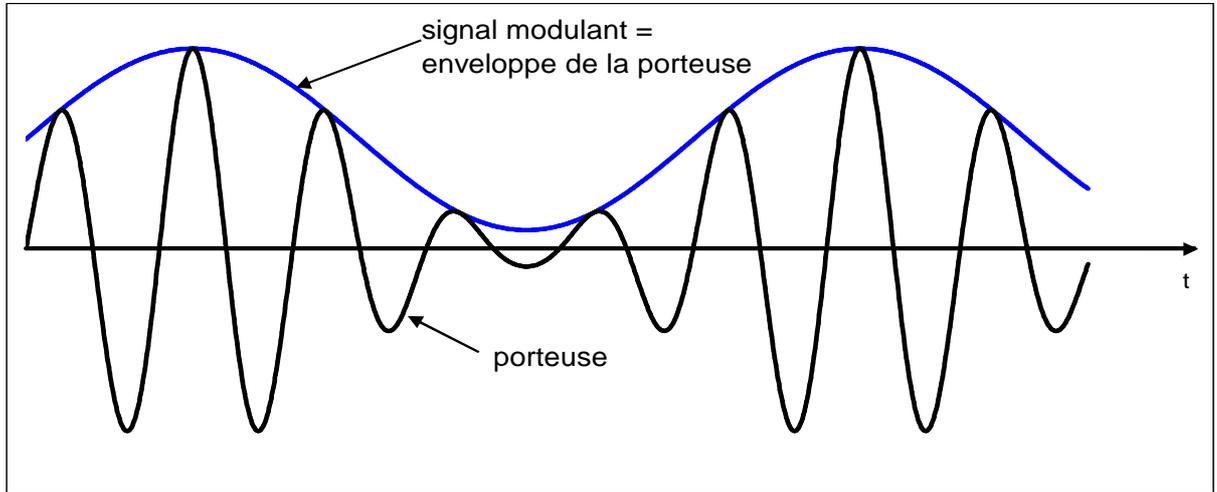


Figure 1 : Principe de la modulation d'amplitude

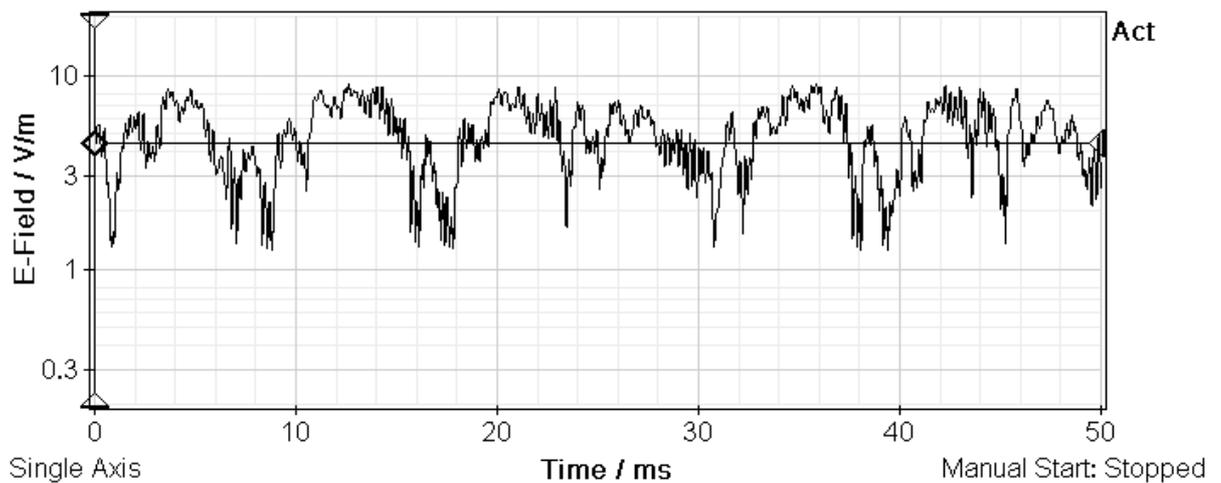
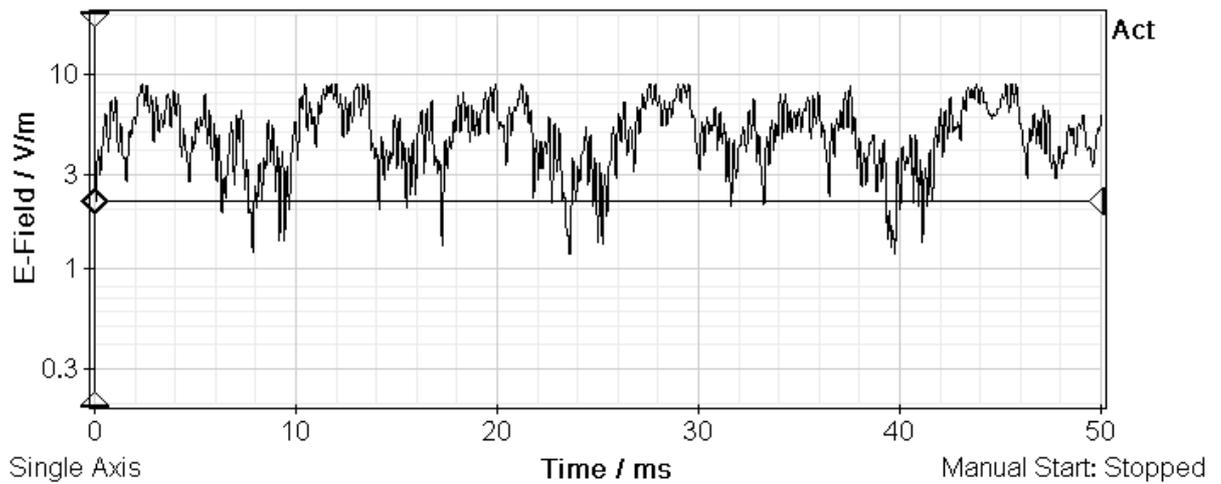


Figure 2 : Mesures de l'enveloppe de la porteuse d'un émetteur de radiodiffusion AM (fréquence centrale : 621 kHz – filtre : 40 kHz – résolution : 25 μ s)

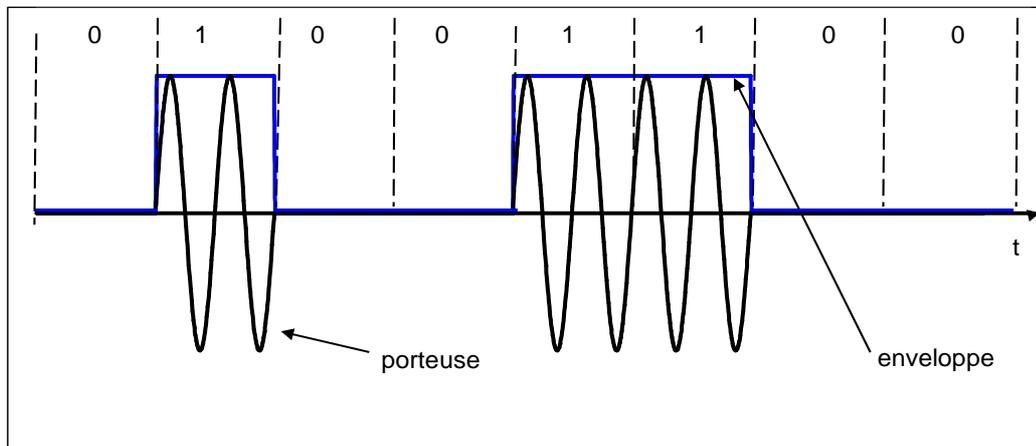


Figure 3 : Modulation numérique d'amplitude (OOK)

La figure 3 décrit le principe de la modulation en amplitude par un signal modulant rectangulaire de type « tout ou rien ». L'émission de la porteuse correspond à la valeur « 1 » tandis que son absence correspond au « 0 ». Elle porte le nom de « modulation OOK » (*on-off keying*). Elle est qualifiée de numérique du fait que l'amplitude de la porteuse ne prend que deux valeurs possibles.

La modulation OOK est, notamment utilisée dans les systèmes d'identification par radiofréquences RFID (*radiofrequency identification*).

Comme le suggère la figure 3, la durée des séquences « on » et « off » dépend de la valeur des bits transmis. Par exemple, une succession de plusieurs bits égaux à 1 se traduit par une porteuse continue pendant la durée correspondante.

On signalera qu'il existe des modulations d'amplitude numériques à plus de 2 niveaux (4, 8, 16, etc.). Elles permettent le codage de symboles correspondant à plusieurs bits et sont souvent combinées avec une modulation de phase. Nous y reviendrons au paragraphe 2.3.3.

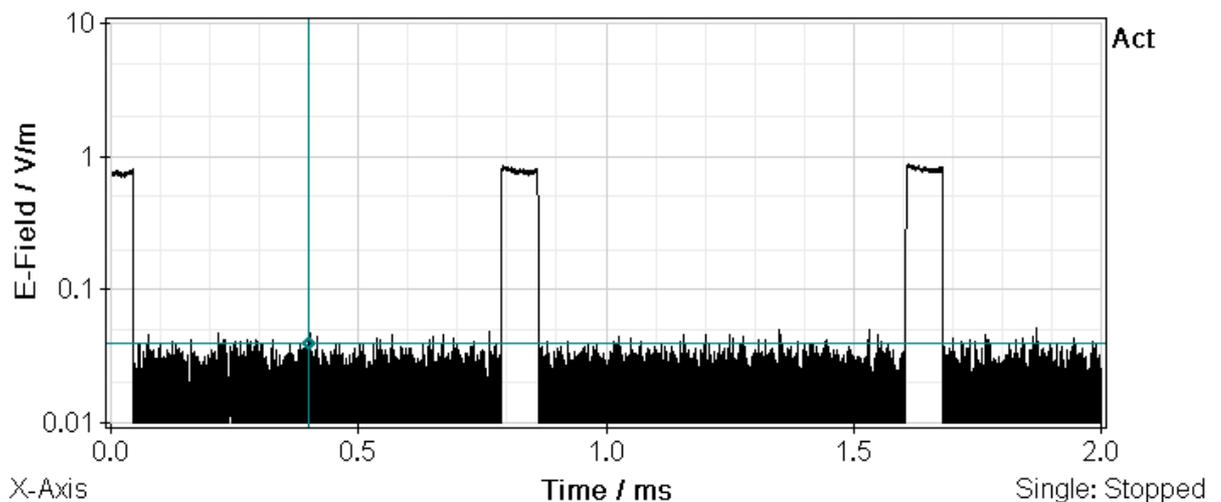


Figure 4 : Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'un radar à impulsions (fréquence centrale : quelques GHz – filtre : 5 MHz – résolution : 200 ns)

Les rayonnements des radars à impulsions (voir figure 4) sont un autre exemple de rayonnement modulé en amplitude « tout ou rien ». Ils sont utilisés pour localiser des objets (avion, bateau, véhicule,...) et éventuellement mesurer leur vitesse. Ils sont constitués de brèves impulsions (généralement quelques dizaines de ns) de très forte puissance séparées par une période de l'ordre de la ms. Bien que les critères définissant le caractère pulsé n'aient pas encore été abordés, on mentionnera que le signal émis par un radar est le type même d'un rayonnement pulsé.

2.3.2. La modulation de fréquence

La modulation de fréquence consiste à faire varier la fréquence de la porteuse en fonction du signal modulant comme le montre la figure 5. Elle est qualifiée « d'analogique » lorsque la fréquence de la porteuse peut prendre n'importe quelle valeur dans un certain intervalle. Elle est notamment utilisée pour la radiodiffusion en fréquence modulée également appelée « radio FM ».

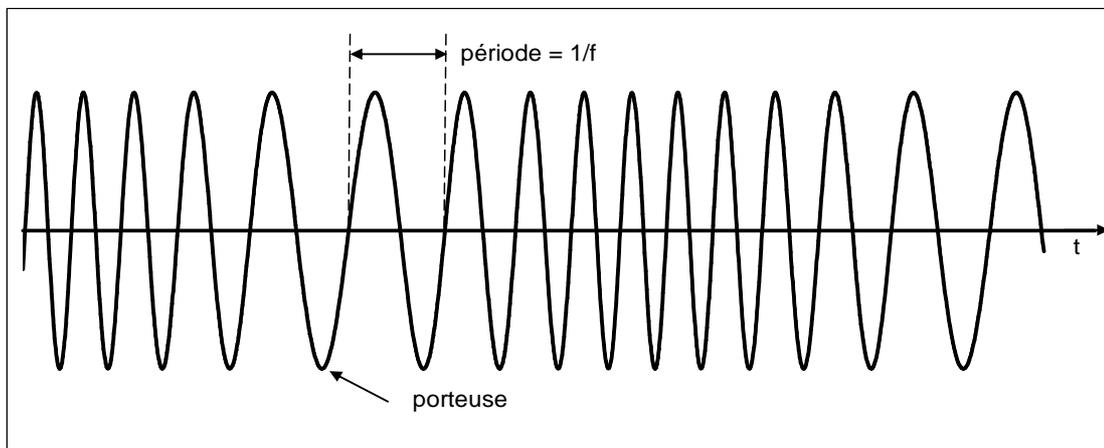


Figure 5 : Principe de la modulation de fréquence

La modulation FSK (*frequency shift keying*) est un cas particulier pour lequel la fréquence de la porteuse ne prend que deux valeurs distinctes. L'une correspond à la valeur binaire « 0 » et l'autre à la valeur « 1 ». De ce fait, la modulation FSK est une modulation numérique.

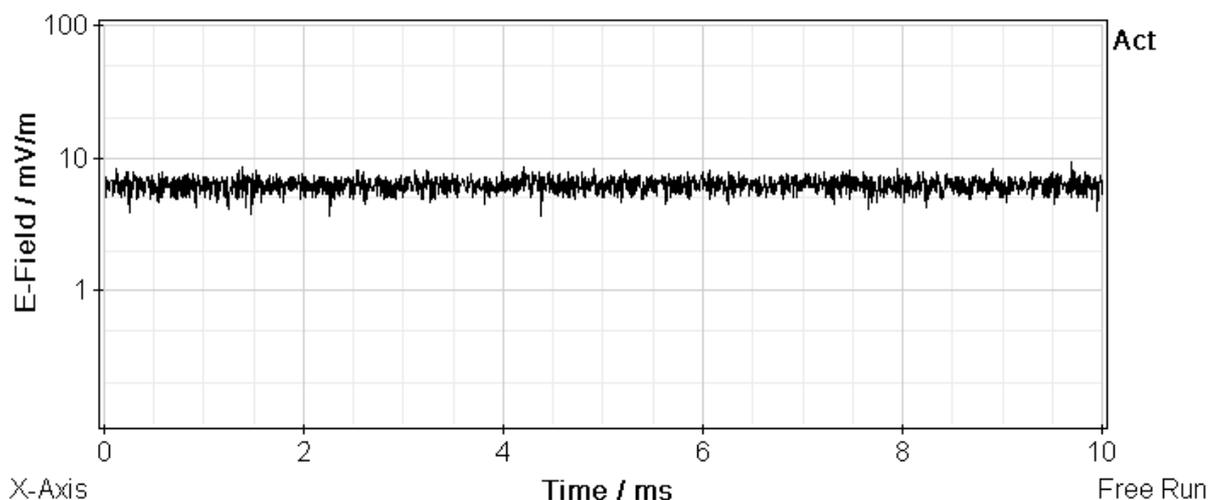


Figure 6 : Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'un émetteur FM (fréquence centrale : 90,5 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)

La modulation de fréquence « à l'état pur » (nous précisons au paragraphe 2.4 ce que nous entendons par là) telle qu'utilisée en radiodiffusion n'affecte pas l'amplitude d'une porteuse. Elle ne provoque donc aucune modification de l'enveloppe (du moins lorsqu'on ne considère que le signal d'un seul émetteur comme nous le verrons dans la suite). La figure 6 représente l'enregistrement d'une telle enveloppe. On signalera que les petites fluctuations qui y apparaissent sont dues aux variations des conditions de propagation durant la mesure. Le terme « signal à enveloppe constante » désigne d'ailleurs généralement le résultat de la modulation de fréquence, qu'elle soit analogique ou numérique. Ce signal, pris isolément, ne peut certainement pas être défini comme « pulsé ».

On signalera qu'une erreur souvent commise consiste à considérer que tous les systèmes de télécommunications numériques génèrent des signaux pulsés. La modulation FSK constitue bien évidemment un excellent contre-exemple puisque l'amplitude de la porteuse n'est pas affectée.

2.3.3. La modulation de phase

La modulation de phase consiste à faire varier la phase de la porteuse en fonction du signal modulant. Comme pour les modulations d'amplitude et de fréquence, la modulation de phase est qualifiée d'analogique ou de numérique selon que la phase de la porteuse peut prendre n'importe quelle valeur ou seulement des valeurs discrètes. Le cas le plus simple est celui de la modulation BPSK (*binary phase shift keying*) qui est présenté à la figure 7. La phase de la porteuse prend la valeur 0 ou 180° selon que c'est la valeur binaire « 0 » ou « 1 » qui est transmise. C'est donc une modulation numérique. Précisons que la sinusoïde de plus faible amplitude sur la figure 7 est la référence de phase. Cette référence a été ajoutée pour décrire le principe. Elle ne fait pas partie du rayonnement émis.

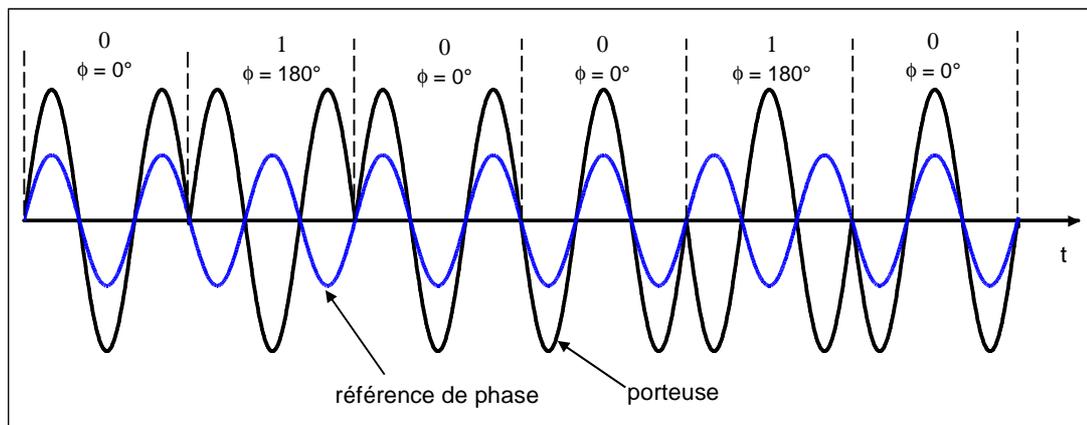


Figure 7 : Principe de la modulation de phase de type BPSK

La figure 8 décrit le principe de la modulation QPSK (*quadrature phase shift keying*) sur laquelle la référence de phase est représentée, pour faciliter la compréhension, par une sinusoïde de plus faible amplitude. Comme dans le cas de la modulation BPSK, cette référence n'est pas rayonnée. La phase peut prendre quatre valeurs discrètes. Chaque ensemble de deux bits est associé à un angle de phase.

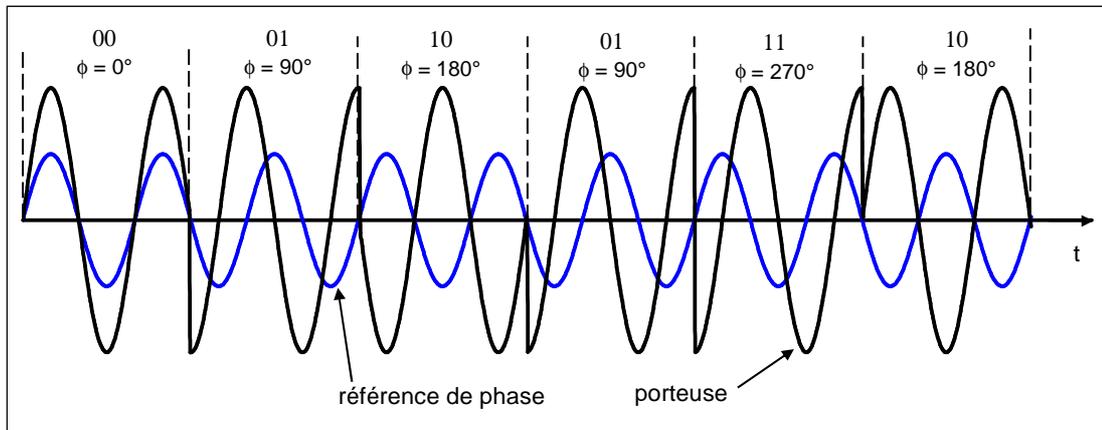


Figure 8 : Principe de la modulation de phase de type QPSK

Dans le cas de la modulation de phase analogique, l'angle de phase peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle compris entre 0 et 360°.

Toutes les formes de modulation de phase « à l'état pur » génèrent une enveloppe constante. Signalons que la brève discontinuité qui se produit au moment du changement de phase n'est que théorique car, contrairement à ce que suggèrent les figures 7 et 8, la transition entre deux états de phase n'est pas instantanée .

Comme mentionné précédemment, les modulations (numériques) d'amplitude et de phase sont parfois combinées. Par exemple, une porteuse dont l'amplitude et la phase peuvent prendre chacune quatre valeurs discrètes définissent 16 états. Cette modulation (appelée 16 QAM pour *quadrature amplitude modulation* à 16 niveaux) permet de coder 16 symboles, ce qui équivaut à quatre bits. De manière similaire, la combinaison désignée par l'abréviation 64QAM permet de coder 64 symboles, ce qui équivaut à six bits.

Les modulations telles que 16QAM et 64QAM produisent des variations de l'enveloppe de la porteuse.

2.4. Effet de la synchronisation et du multiplexage

S'agissant de l'étude des variations de l'enveloppe d'un signal rayonné, il est important de ne pas confondre l'effet d'une modulation d'amplitude de type OOK, laquelle provoque des interruptions de l'émission, et les variations d'enveloppe résultant d'un multiplexage temporel ou produites dans un but de synchronisation.

Par exemple, la porteuse rayonnée par les émetteurs de télévision analogique présente des variations à des fins de synchronisation comme l'illustrent les enregistrements des figures 9 et 10. La première figure permet d'identifier les impulsions de synchronisation des lignes à la fréquence de 15 625 Hz. Elles correspondent aux maxima apparaissant toutes les 64 µs. Les variations du signal entre deux impulsions sont dues à la modulation d'amplitude qui est liée à l'intensité lumineuse (plus précisément la luminance et la chrominance) de chaque point de l'image. La figure 10 permet de distinguer les impulsions de synchronisation des trames (deux trames successives forment une image) à la fréquence de 50 Hz.

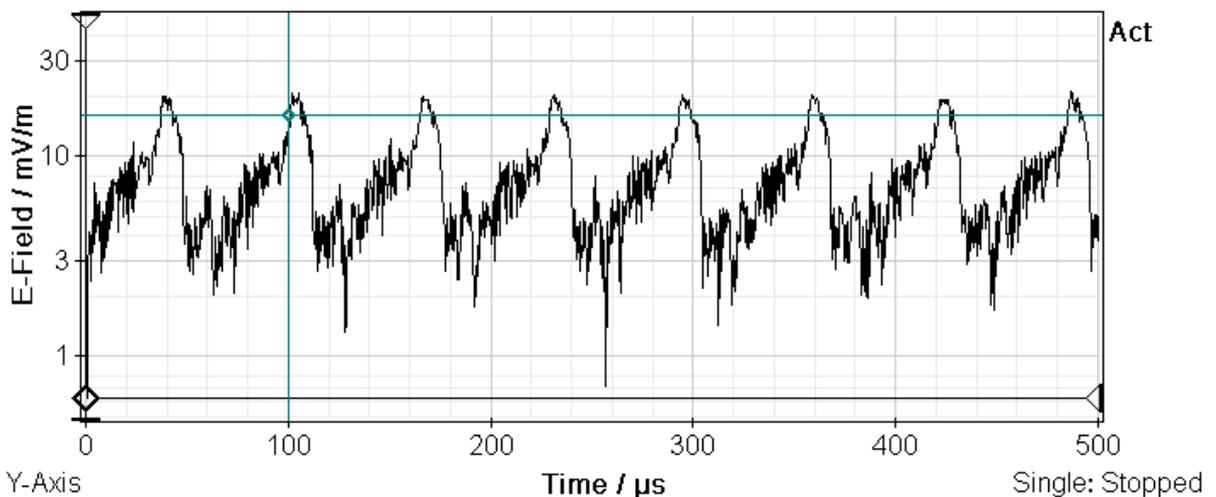


Figure 9 : Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'un émetteur de télévision analogique (fréquence centrale : 783,25 MHz – filtre : 3,2 MHz – résolution : 312,5 ns)

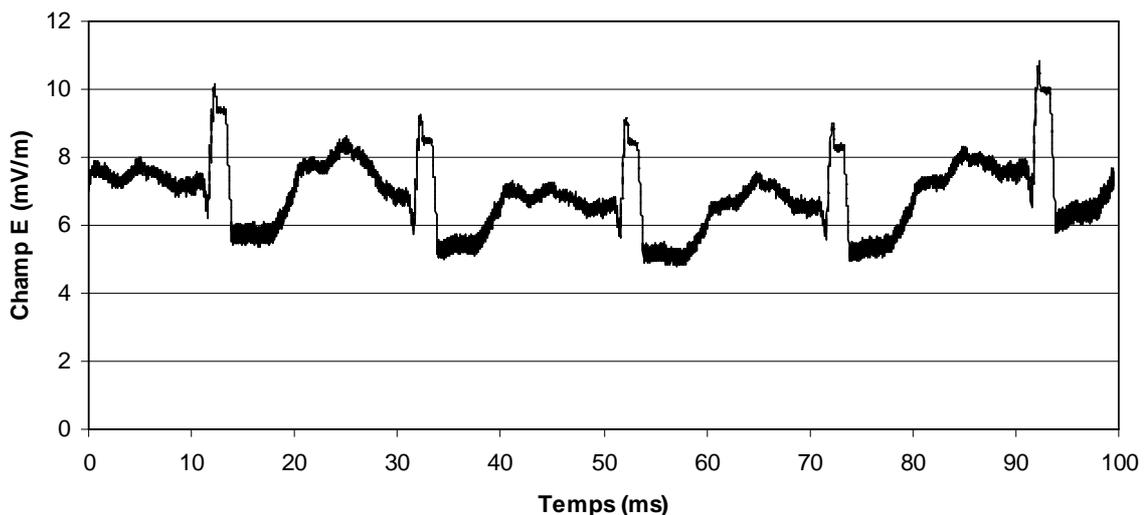


Figure 10 : Mesure de l'enveloppe moyenne du rayonnement d'un émetteur de télévision analogique (fréquence centrale : 783,25 MHz – filtre : 10 MHz – résolution : 504 μs)

La figure 9, et davantage encore la figure 10, illustrent le fait que de nombreux systèmes analogiques produisent un rayonnement caractérisé par de fortes variations assimilables à des impulsions. Contrairement aux cas des signaux rayonnés par les radars et les téléphones portables (voir paragraphe 2.6), ces impulsions de synchronisation (de ligne et de trames) sont suivies d'un retour à un niveau qui n'est pas nul. On mentionnera que de nombreuses études concluent au caractère pulsé de ces signaux ou à la présence de composantes de basse fréquence après détection de l'enveloppe de la porteuse. C'est le cas notamment des deux rapports suivants :

- [AFSSE 2003] à la page 16 où l'on peut lire : « *Les ondes TV, au contraire, peuvent être considérées comme "pulsées", en raison des impulsions de synchronisation des images dont les fréquences de répétition sont de 50 Hz, pour le renouvellement des images, et 15.625 Hz pour la synchronisation de ligne.* »
- [CSS – avis 8194] où le tableau de la page 7 renseigne la présence, après détection de l'enveloppe de la porteuse, de composantes à 50 Hz.

On ne doit donc pas considérer d'office que tout système numérique émet un rayonnement pulsé et que, au contraire, ceux émis par les systèmes analogiques ne le sont pas. Nous y reviendrons ultérieurement.

Le multiplexage par répartition dans le temps ou TDMA (*time division multiple access*) est utilisé pour transmettre plusieurs communications par une seule porteuse. Le principe consiste à allouer une fraction du temps (*time slot*) à chaque communication. Ce multiplexage provoque dans certains cas une interruption de l'émission de la porteuse. Par exemple, une antenne-relais GSM émet un signal d'une durée de 547,6 μs suivi d'un arrêt de 29,4 μs , ce qui a pour but d'isoler les *time slots*. La figure 11 met en évidence cette discontinuité de la porteuse qui transmet le canal de contrôle appelé « BCCH » (désignée « porteuse BCCH » dans la suite du présent rapport²). La discontinuité dont il est question ici n'est pas liée à la modulation, puisque les signaux GSM utilisent la modulation GMSK (*gaussian minimum shift keying*) qui est une forme évoluée de la modulation de fréquence FSK qui, en temps que telle, produit un signal à enveloppe constante. Dans le cas du rayonnement d'une station de base GSM, c'est bien le multiplexage et non la modulation qui provoque les extinctions de la porteuse.

Cette remarque justifie l'expression « à l'état pur » utilisée, au paragraphe 2.3, où nous écrivions que les modulations de fréquence et de phase génèrent une enveloppe constante.

L'extinction de la porteuse se produisant toutes les 577 μs , les 29,4 μs correspondent à 5% de la durée d'un cycle. La fréquence de la porteuse étant proche de 900 MHz, sa période est d'environ 1 ns. La durée de l'extinction représente donc environ 30 000 périodes de la porteuse.

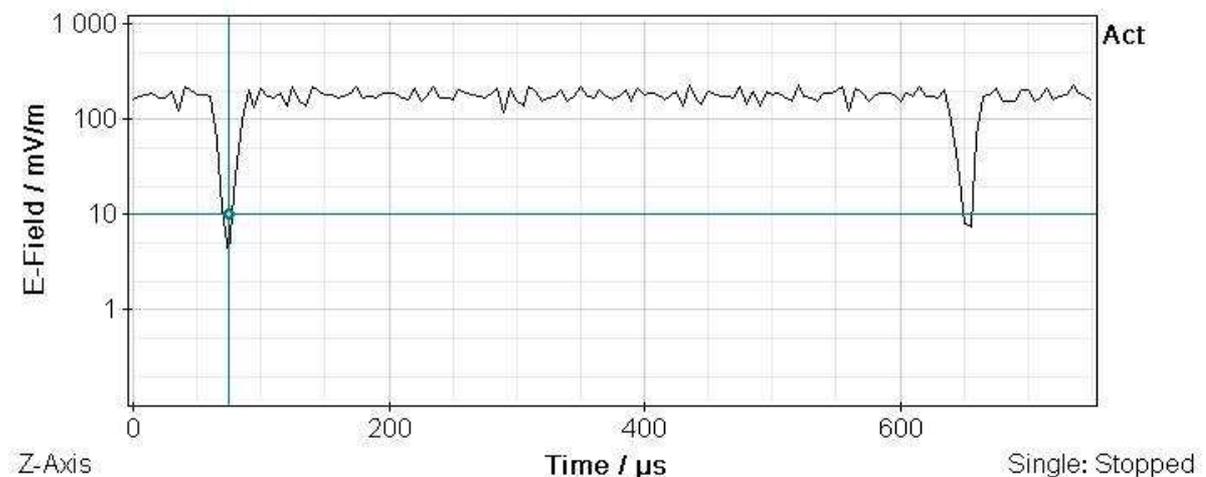


Figure 11 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse BCCH d'une station de base GSM (fréquence centrale : 949,4 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μs)

Des interruptions de la porteuse se produisent également lorsqu'une même fréquence est utilisée, alternativement, en émission et en réception. C'est ce que l'on appelle le duplexage par séparation temporelle ou TDD (*time-division duplex*). Pour certains systèmes, la durée de l'émission et celle de la réception varient en fonction du débit dans chaque sens de transmission (voie montante et voie descendante). L'enveloppe du signal généré a donc une allure comparable à celle de la figure 11, avec des temps d'arrêt plus longs, mais à intervalles réguliers. Cette technique est notamment mise

² On signalera que la porteuse BCCH transmet également 7 canaux de trafic.

en œuvre dans les réseaux de téléphonie de troisième génération de type UMTS TDD. Cette variante n'est pas utilisée en Belgique, du moins actuellement³.

2.5. Exposition aux rayonnements de plusieurs émetteurs de même type

La figure 6 montre qu'un émetteur de radiodiffusion FM, considéré isolément, produit un rayonnement dont l'enveloppe est pratiquement constante. Il est toutefois évident que l'on est généralement exposé à des signaux de plusieurs émetteurs FM (parfois émis à partir d'un même site d'antennes). Les tissus vivants n'ayant pas la capacité d'isoler une seule porteuse, il convient de tenir compte de la superposition de l'ensemble des rayonnements susceptibles d'être présents simultanément en un même lieu et de produire les mêmes effets, ce qui pourrait être le cas lorsque les fréquences sont relativement proches. Or, on sait que l'addition de deux signaux de fréquences voisines donne lieu à un phénomène de battement. Par exemple, deux porteuses dont la fréquence est égale à 99 et 101 MHz produisent un champ résultant dont la fréquence est égale à 100 MHz (moyenne des fréquences des signaux incidents) et dont l'amplitude varie à une fréquence égale à 2 MHz (différence des fréquences des signaux incidents).

Les situations rencontrées en pratique sont beaucoup plus complexes puisqu'il y a souvent plus de deux porteuses (d'amplitude significative) présentes au même endroit. Néanmoins, on comprend aisément que le champ total où l'on est soumis à plusieurs signaux FM présente des variations bien plus importantes que ne l'indique la figure 6. A titre d'exemple, la figure 12 représente le spectre des fréquences mesuré dans une telle situation. Les pics les plus élevés sont produits par les émetteurs situés sur un même site tandis que les autres, plus faibles, proviennent d'émetteurs éloignés. La figure 13 représente la mesure, sur une durée de 100 μ s, de l'enveloppe du cumul de ces différents signaux. On observe que l'amplitude du signal varie fortement et l'on ne peut certainement plus parler de signal à enveloppe constante, ce qui était pourtant le cas de toutes ses composantes. Ce constat est très important car il démontre que plusieurs sources de rayonnement d'amplitude constante produisent un champ total caractérisé par d'importantes variations. Cet aspect doit bien sûr être pris en compte dans l'élaboration des critères définissant le caractère pulsé des rayonnements.

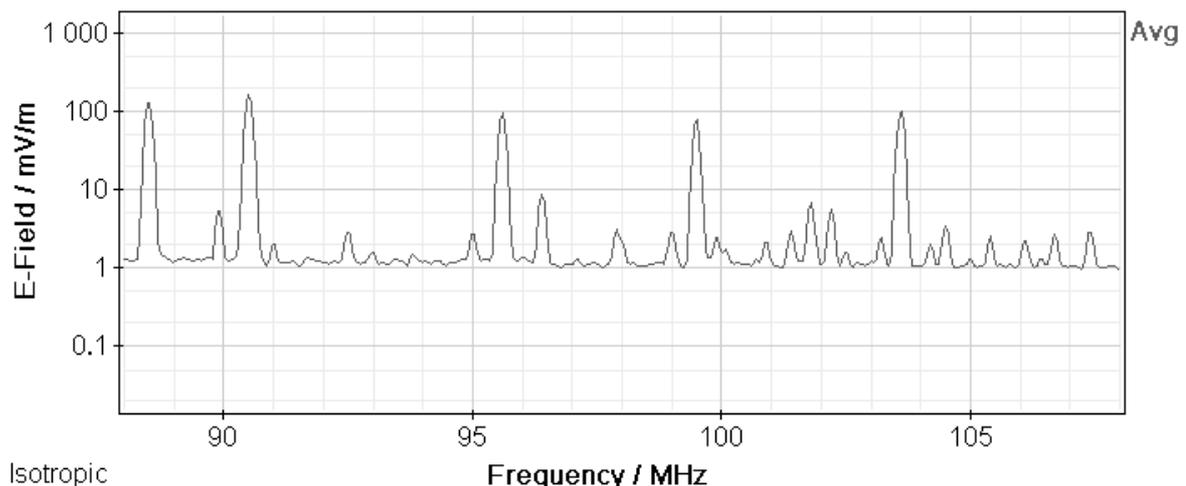


Figure 12 : Mesure du spectre des rayonnements de plusieurs émetteurs de radiodiffusion FM (filtre : 100 kHz)

³ Seule la version UMTS FDD (*frequency-division duplex*) est déployée. Elle est basée sur duplexage fréquentiel, ce qui signifie que l'antenne-relais et le téléphone portable émettent simultanément dans des bandes de fréquences distinctes.

Selon la figure 13, certaines variations indiquent une chute du champ (exprimé en V/m) d'un facteur 20, voire davantage, ce qui est assimilable à une extinction du rayonnement (une chute du champ d'un facteur 20 signifie que la densité de puissance est divisée par 400). On notera cependant que leur durée est très brève puisqu'elle est du même ordre que la résolution temporelle de la figure qui est de 50 ns et que chaque chute n'est généralement représentée que par un seul point de l'enregistrement. La fréquence des porteuses étant proche de 100 MHz, la période est d'environ 10 ns. La durée d'une chute correspond donc à quelques périodes de la porteuse, ce qui est d'un tout autre ordre que l'interruption de la porteuse GSM qui elle est d'environ 30 000 périodes.

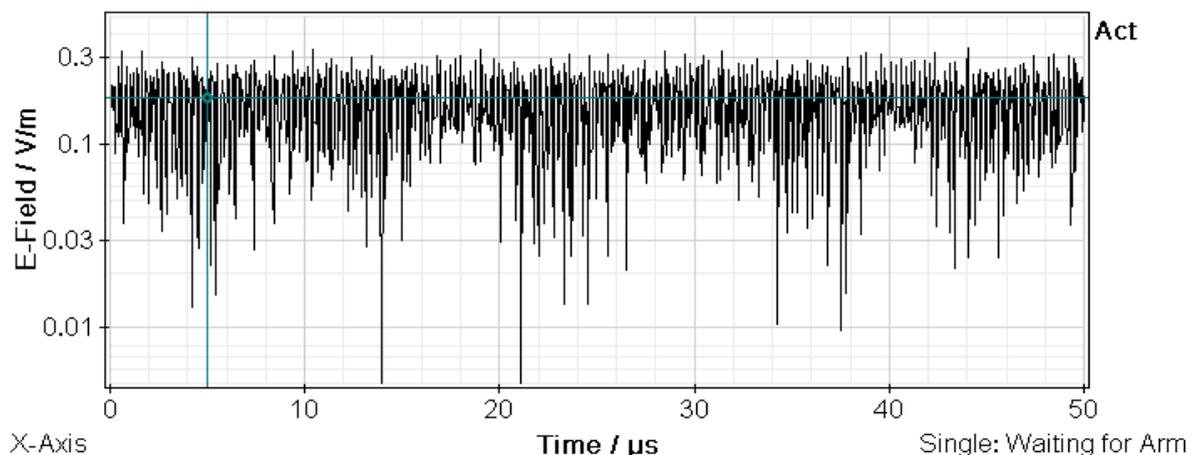


Figure 13 : Mesure de l'enveloppe du cumul des rayonnements de plusieurs émetteurs de radiodiffusion FM (fréquence centrale : 98 MHz – filtre : 20 MHz – résolution : 50 ns)

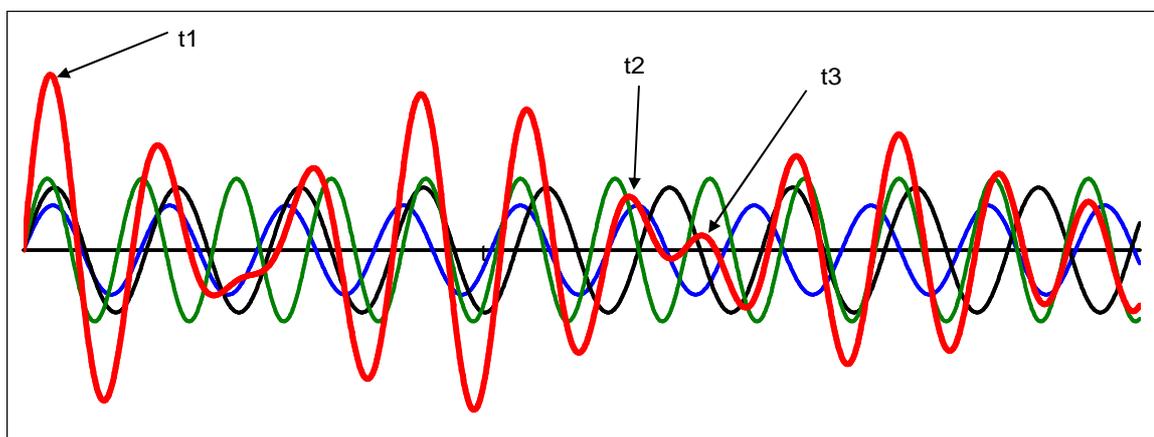


Figure 14 : Mesure de l'enveloppe du cumul des trois sinusoïdes de fréquences proches

Les variations d'intensité d'un cumul de plusieurs rayonnements de fréquences différentes s'expliquent par le fait que les différentes composantes se décalent progressivement dans le temps. A un moment donné, les composantes dominantes se trouvent approximativement en phase (les alternances de même signe se renforcent), ce qui donne lieu à un cumul élevé. Après un certain temps, les déphasages entre les diverses composantes se sont modifiés et elles se neutralisent partiellement, voire totalement. La figure 14 illustre ce phénomène pour trois signaux d'amplitude voisine. Durant la première période examinée (autour de l'instant t_1), les trois signaux sont pratiquement en phase, d'où un cumul élevé. Un peu plus tard (autour de l'instant t_2), deux signaux sont presque en phase, mais le troisième est en opposition, d'où un cumul plus faible. Après un délai supplémentaire (autour de l'instant t_3), la somme des trois signaux s'annule pratiquement.

Comme le fait apparaître l'analyse de la figure 13, même si les interruptions dues à une addition de rayonnements sont importantes et par conséquent assimilables à une extinction, elles sont très brèves. Leur durée dépend des écarts entre les fréquences de ces différents rayonnements. En pratique, on constate qu'elles ne dépassent pas quelques centaines de fois la période moyenne de ces rayonnements. A l'opposé, la durée des interruptions dues au multiplexage ou à la synchronisation correspondent à un nombre de périodes de la porteuse qui est beaucoup plus élevé (30 000 dans le cas des standards GSM et DCS 1800).

Il convient d'insister sur le fait qu'une addition de rayonnements de différentes fréquences et d'amplitude comparable conduit inévitablement à un cumul qui présente de fortes chutes qui se répètent à une cadence variable.

Une des conditions pour que le phénomène que nous venons de décrire se produise est que les composantes dominantes aient des amplitudes comparables. En effet, si deux rayonnements de fréquences f_1 et f_2 et dont les amplitudes sont respectivement de 1 et 0,1 V/m sont présents en un point, la deuxième composante est beaucoup trop faible pour pouvoir annuler la première.

Tout comme dans le cas des émetteurs de radiodiffusion FM, on doit tenir compte de la superposition des différents signaux de téléphonie mobile, du moins ceux dont les fréquences sont proches. Il peut s'agir des porteuses émises par :

- une même antenne (une antenne en émet généralement quelques-unes) ;
- plusieurs antennes sur le même site ;
- plusieurs antennes sur des sites voisins et éventuellement exploitées par différents opérateurs.

A titre d'exemple, la figure 15 représente l'enveloppe du cumul des rayonnements dans la bande comprise entre 925 et 960 MHz (allouée au réseau GSM 900). On constate que ce cumul présente des chutes espacées de 577 μ s, tout comme la figure 11.

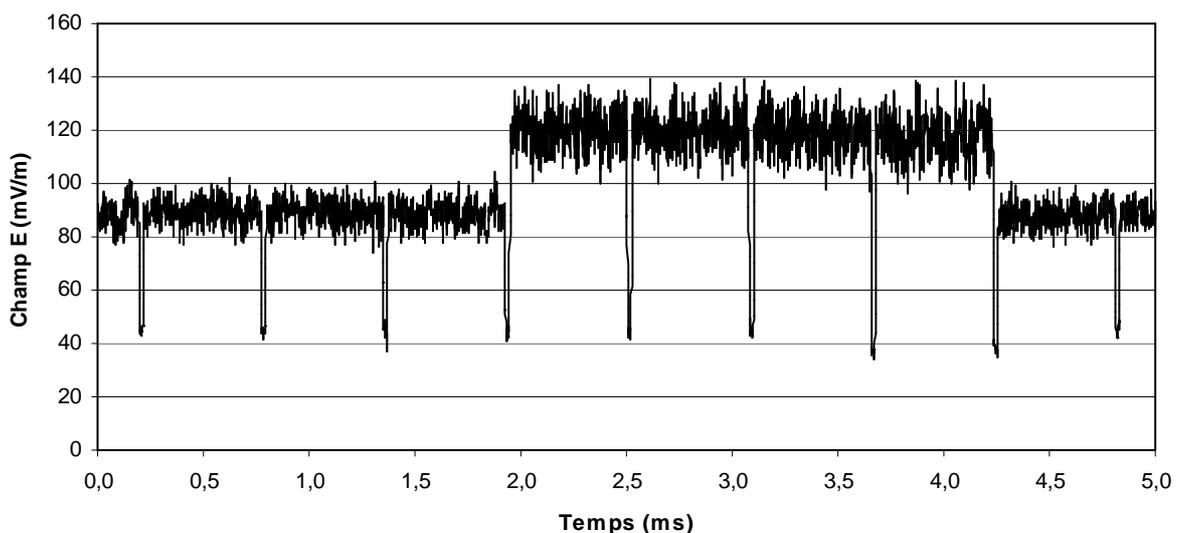


Figure 15 : Mesure de l'enveloppe moyenne du cumul des rayonnements de plusieurs stations de base GSM (fréquence centrale : 940 MHz – filtre : 32 MHz – résolution : 1375 ns)

2.6. Définition d'une onde pulsée

Avant d'aborder les critères définissant le rayonnement pulsé, on rappellera l'erreur souvent commise consistant à considérer que le rayonnement de tous les systèmes de télécommunications numériques est pulsé et, inversement, que celui de tous les systèmes analogiques est continu. Les contre-exemples suivants démontrent que c'est inexact :

- le radar à impulsions est un système analogique dont le rayonnement est le type même d'une émission pulsée ;
- les modulations de fréquence et de phase de type numérique telles que les FSK, BPSK, QPSK sont caractérisées par une enveloppe constante. En temps que telles, elles ne produisent pas un rayonnement pulsé sauf si la porteuse subit des interruptions, par exemple à cause du processus de multiplexage ou dans un but de synchronisation.

En résumé, le caractère "pulsé" n'est généralement pas lié à la nature numérique de la modulation, mais, notamment, au type de multiplexage ou à la présence de signaux de synchronisation.

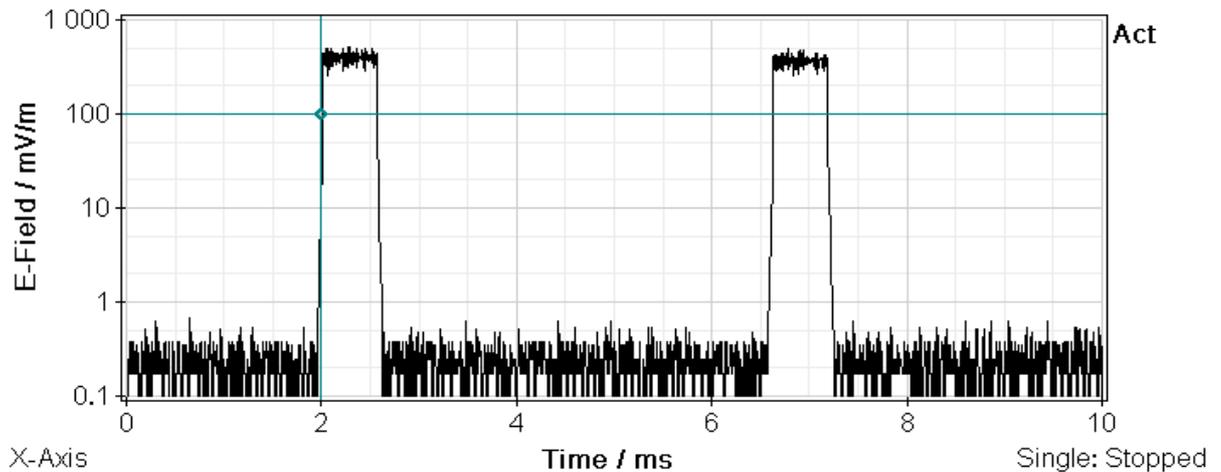
Comme précisé en introduction, l'objectif fixé par l'IBGE n'était pas de se prononcer sur l'existence d'un risque spécifique qui résulterait du caractère pulsé des ondes électromagnétiques radiofréquences. A ce sujet, on rappellera l'avis du Conseil Supérieur de la Santé [CSS – avis 8194] qui traite des ondes pulsées et des ondes modulées en amplitude. Le domaine investigué dans cet avis est donc plus large que celui de la présente étude qui se limite au premier aspect et qui est le seul visé par l'Ordonnance. Pour rappel, la conclusion (page 20) était que : « *il a été constaté qu'il n'existe pas de preuves que ces ondes provoquent un effet sur la santé, mais qu'il existe toutefois un certain nombre d'indications incitant à la prudence.* »

Les critères définissant le rayonnement pulsé devant servir dans le contexte d'une réglementation relative à la protection contre d'éventuels effets sanitaires, il serait logique que ces critères aient un lien, au minimum supposé, avec les effets allégués. Aucun mécanisme d'action dépendant de la forme du signal émis n'ayant été identifié à ce jour (du moins pour les champs de faible intensité), fixer de tels critères introduit inévitablement une part d'arbitraire dans les choix que l'on est amené à faire. A titre d'exemple, une impulsion est caractérisée par des paramètres tels que la durée, le rapport cyclique (durée de l'impulsion divisé par sa période), la forme (rectangulaire, triangulaire, etc.), les temps de montée et de descente. A défaut d'effet sanitaire identifié, on ne connaît pas l'influence de chacun de ces paramètres et toutes les formes d'impulsions doivent par conséquent être prises en compte. Elles semblent rectangulaires dans la plupart des cas, mais une analyse plus fine de leur enveloppe révèle que leur forme est en fait trapézoïdale car les temps de montée et de descente ne sont pas nuls. D'ailleurs, rien ne permet d'exclure de la catégorie des rayonnements pulsés les signaux caractérisés par d'importantes variations d'amplitude avec des temps de montée et de descente non négligeables.

Quels que soient les critères adoptés, il est toutefois communément admis que le rayonnement émis par un radar à impulsions (figure 4) est le type même d'un signal pulsé.

Comme le montre la figure 16, l'enveloppe du signal émis par un téléphone portable « 2G » (norme GSM⁴) est semblable à celle du radar. Une impulsion d'une durée de 547,6 μ s est émise toutes les 4,615 ms, c'est-à-dire à une fréquence de répétition de 216,7 Hz. Le signal produit par un téléphone portable GSM constitue donc également un cas typique de signal pulsé. Comme expliqué au paragraphe 2.4, c'est une conséquence du multiplexage TDMA et non de la modulation utilisée.

⁴ L'enveloppe du signal rayonné par les téléphones portables « 3G » (norme UMTS) n'a rien de commun avec la figure 16.



**Figure 16 : Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'un téléphone portable GSM
(fréquence centrale : 886,8 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)**

Concernant les antennes des stations de base de téléphonie mobile, il a été mentionné, au paragraphe 2.4, que la porteuse BCCH comportait une impulsion d'une durée de 547,6 μ s suivie d'une extinction d'une durée de 29,4 μ s. La durée de l'impulsion est, dans ce cas, légèrement inférieure à celle du cycle. Le point commun entre les figures 4, 11 et 16 est la présence d'interruptions répétées de la porteuse. Ainsi, un premier critère définissant le caractère pulsé d'une émission radioélectrique est l'existence d'interruptions récurrentes. On notera également qu'il est logique de considérer qu'une importante chute de l'amplitude de la porteuse équivaut à une interruption. Par exemple, une chute de la densité de puissance de 90 % pourrait être considérée comme une interruption, ce qui correspond à une diminution du champ (exprimé en V/m) d'un facteur 3,16 (ou un rapport de 10 dB). Une telle démarche est scientifiquement défendable bien que le choix du pourcentage soit arbitraire et impossible à justifier sur base de critères sanitaires.

On notera cependant que la figure 13 relative au cumul des signaux de plusieurs émetteurs de radiodiffusion FM montre d'importantes variations de l'amplitude de la porteuse dont certaines sont assimilables à une extinction (chute du champ, exprimé en V/m, d'un facteur 20). L'analyse de la figure indique que, contrairement aux signaux des figures 4, 11 et 16, les chutes du signal sont très brèves et sont dues à l'addition de plusieurs rayonnements de même type. Comme exposé au paragraphe 2.5, leur durée est en principe inférieure à quelques centaines de périodes de la porteuse. Ce qui distingue l'enveloppe des figures 4, 11 et 16 de celle de la figure 13 est la durée des extinctions. Tenant compte de cette remarque, le critère définissant le caractère pulsé d'un rayonnement pourrait résider dans le fait qu'il est interrompu de manière récurrente et pendant une durée minimale que l'on peut éventuellement exprimer par un nombre de périodes de la porteuse. On insistera sur le fait que l'absence de critère sur la durée minimale de l'interruption impliquerait que tous les rayonnements émis par des antennes devraient être considérés comme pulsés.

Tenant compte de ces remarques, le critère définissant une émission radioélectrique pulsée serait le suivant :

« Emission radioélectrique, qui en fonctionnement normal, subit de manière permanente ou intermittente, des interruptions récurrentes. Est considérée comme une interruption un intervalle de temps de minimum 10 000 périodes des porteuses durant lequel l'immission (exprimée par la densité de puissance en W/m²) subit une chute de 90%. »

Cette définition appelle les commentaires suivants :

- rappelons que l'on est généralement exposé à plusieurs rayonnements de même type (notamment plusieurs porteuses GSM pouvant même, dans certains cas, provenir de réseaux différents) et que les tissus vivants n'ont pas la capacité d'isoler une seule porteuse. Par conséquent, on ne peut se limiter à analyser la forme d'une seule porteuse. Il faut, au contraire, du moins lorsque c'est pertinent, tenir compte de l'évolution temporelle du cumul de plusieurs porteuses de même type et qui sont susceptibles d'être présentes au même endroit. Cette approche revient à considérer l'évolution temporelle de l'ensemble des rayonnements dans la bande de fréquences allouée à chaque système de communication examiné ;
- « en fonctionnement normal » signifie que sont exclus les signaux transitoires pouvant être émis à la mise sous tension ou lors de l'extinction d'un appareillage ;
- « de manière permanente ou intermittente » : pour certains systèmes, la présence d'interruptions dépend du niveau de trafic ;
- une chute de 90 % de l'immission (exprimée par la densité de puissance) équivaut à un rapport de 10 dB. Elle correspond à une diminution du champ d'un facteur 3,16.

Rappelons qu'un rapport exprimé en décibels (dB) concerne toujours implicitement un rapport de puissance (ou de densités de puissance). Calculer un rapport en décibels à partir des tensions (ou des champs en V/m) implique d'élever celles-ci au carré, ce que résument les relations⁵ ci-dessous :

$$\left(\frac{E_{\max}}{E_{\min}}\right)_{dB} = 10 \log \frac{S_{\max}}{S_{\min}} = 10 \log \frac{E_{\max}^2}{E_{\min}^2} = 20 \log \frac{E_{\max}}{E_{\min}}$$

dans lesquelles S_{\max} et E_{\max} représentent la densité de puissance (en W/m^2) et le champ (en V/m) avant la chute tandis que S_{\min} et E_{\min} représentent ces mêmes grandeurs après la chute.

La figure 17 illustre par deux exemples la définition proposée.

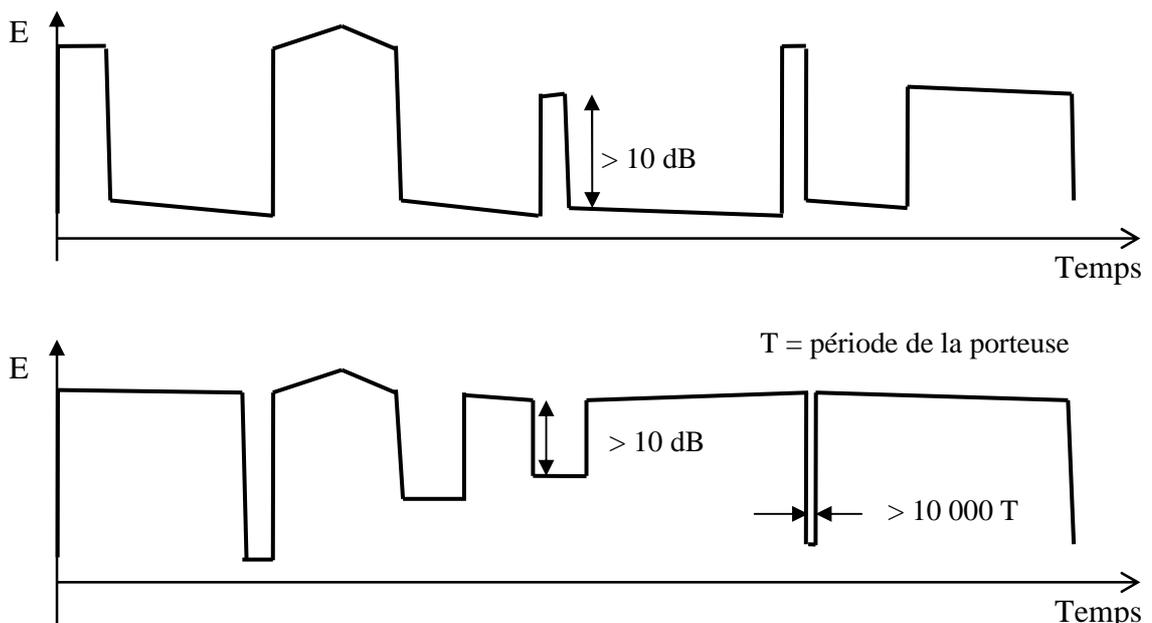


Figure 17 : Exemples d'enveloppe d'un signal pulsé répondant à la définition proposée

⁵ log désigne le logarithme décimal.

Il est intéressant de confronter cette définition à l'enregistrement repris à la figure 2 qui est relatif au rayonnement d'un émetteur de radiodiffusion AM analogique. On observe l'apparition de chutes récurrentes d'une quinzaine de dB par rapport au sommet de l'enveloppe. La durée de ces chutes est très brève, tout au plus une centaine de μ s, c'est-à-dire moins d'une centaine de cycles de la porteuse dont la fréquence est de quelques centaines de kHz. Pour cette raison, le rayonnement de ce type d'émetteurs ne doit pas être considéré comme pulsé.

Bien que les émetteurs de radiodiffusion AM analogique ne fassent pas partie de la présente étude, ils constituent un cas particulièrement intéressant qui illustre le caractère ténu de la limite qui sépare les rayonnements pulsés de ceux qui sont modulés en amplitude. On rappellera d'ailleurs que l'avis du Conseil Supérieur de la Santé [CSS – avis 8194] a globalisé les deux aspects.

3. MESURES ET ANALYSES

3.1. Méthode d'analyse

La demande de l'IBGE⁶ dresse la liste des systèmes de télécommunications radiofréquences qu'il y a lieu de classer selon leur caractère pulsé ou non pulsé. Pour ce faire, une première étape a consisté à analyser les caractéristiques des différents systèmes de télécommunications à partir des éléments disponibles dans la littérature et plus particulièrement les normes définissant la forme des rayonnements émis. Ceux-ci ont ensuite été enregistrés à proximité de site en service. Cette approche était tout à fait indiquée pour traiter certaines technologies qui mettent en œuvre des processus de modulation ou de multiplexage complexes (tels que l'UMTS ou le LTE, par exemple) pour lesquels la description des signaux émis ne permet pas toujours de se prononcer sur leur caractère pulsé. Les résultats des mesures ont ensuite été confrontés à la définition du rayonnement pulsé proposée au paragraphe 2.6.

Les mesures ont été réalisées en utilisant les appareils suivants :

- un analyseur de spectre NARDA de type SRM 3006 ;
- une sonde triaxiale NARDA de type P/N 3501/03 pour la mesure de la composante radioélectrique dans la bande de fréquences comprise entre 27 et 3000 MHz ;
- une sonde triaxiale NARDA de type P/N 3502/01 pour la mesure de la composante radioélectrique dans la bande de fréquences comprise entre 420 et 6000 MHz ;
- une antenne boucle SCHWARZBECK MESS-ELEKTRONIK de type HMDA 1545 (sensible à la composante magnétique) couvrant la bande comprise entre 9 kHz et 80 MHz.

Ces appareils étaient en ordre d'étalonnage et sont fréquemment contrôlés par rapport à une référence.

L'analyseur de spectres a été utilisé en mode « *Spectrum Analysis* » afin de déterminer les différentes composantes d'un signal dans une bande de fréquences donnée. Le mode « *Scope* »⁷ est utilisé pour enregistrer l'enveloppe des signaux. Ce mode fournit l'amplitude du signal dans une bande de fréquences (désignée ci-après « le filtre ») située autour d'une fréquence centrale. La largeur du filtre est choisie de manière à prendre en compte toute la puissance transmise par une ou plusieurs porteuses selon le cas.

⁶ Demande datée du 18 juillet 2011.

⁷ Ce mode correspond à ce qui est généralement appelé « mode *zero span* ».

Lorsque le temps de balayage est inférieur à 16 000 fois la résolution temporelle, l'appareil affiche une courbe obtenue en une seule mesure (le message « Act » apparaît à droite de l'enregistrement). La légende des figures obtenues de cette manière mentionnera : « *Mesure de l'enveloppe d'une porteuse ...* »

Si par contre, le temps de balayage dépasse 16 000 fois la résolution temporelle, l'appareil fournit les valeurs maximales, minimales et moyennes calculées sur plusieurs mesures. Dans pareil cas, c'est la courbe des valeurs moyennes qui est reprise dans les figures de ce rapport. La légende des figures correspondantes mentionnera : « *Mesure de l'enveloppe moyenne d'une porteuse ...* »

Afin d'obtenir la résolution temporelle maximale en mode *Scope*, les mesures d'enveloppe ont à chaque fois été effectuées dans un seul axe de polarisation du champ.

Les mesures et les figures qui en résultent ont été obtenues sans le concours de l'exploitant des sources examinées à l'exception des trois cas suivants :

- les enregistrements des rayonnements UMTS HSDPA dans les locaux de la société MOBISTAR à Bruxelles. L'assistance de l'exploitant était nécessaire pour générer un trafic représentatif ;
- les enregistrements des rayonnements d'une station de base LTE sur laquelle la société BELGACOM-PROXIMUS effectue divers essais. Ce réseau n'étant pas encore exploité commercialement, produire un rayonnement nécessitait bien évidemment l'intervention de l'opérateur ;
- les enregistrements des rayonnements de stations de base GSM-R à Hergenrath à la frontière entre la Belgique et l'Allemagne. Ces mesures ont été effectuées en présence de représentants de la société B Holding et avaient pour but de comparer les caractéristiques des réseaux GSM-R des deux pays. Cette question est traitée au paragraphe 3.2.7.

3.2. Résultats des analyses et classification des rayonnements

3.2.1. Radiodiffusion en fréquence modulée FM

Comme expliqué au paragraphe 2.5, l'émission radioélectrique associée à la radiodiffusion en fréquence modulée FM ne génère pas de variation notable d'amplitude lorsque l'on ne considère que le signal d'un seul émetteur. Par contre, l'amplitude du champ total varie fortement dans les cas d'exposition à plusieurs émetteurs ainsi que le démontre la figure 13. Ces variations se produisent à une cadence irrégulière et sont de très courte durée (de l'ordre de quelques périodes de la porteuse). Selon les critères établis au paragraphe 2.6, les signaux émis par des émetteurs de radiodiffusion FM ne sont pas pulsés.

3.2.2. Radiodiffusion en modulation d'amplitude AM

Selon la figure 2, la radiodiffusion AM présente des chutes récurrentes d'une quinzaine⁸ de dB qui sont dues à la modulation analogique. La durée de ces chutes est très brève, tout au plus une centaine de μ s, c'est-à-dire moins d'une centaine de cycles de la porteuse dont la fréquence est de quelques centaines de kHz. Pour cette raison, et selon les critères établis au paragraphe 2.6, les signaux émis par des émetteurs de radiodiffusion en modulation d'amplitude ne sont pas pulsés.

⁸ Selon la figure, $E_{\max} \approx 9$ et $E_{\min} \approx 1,5$. Par conséquent, $E_{\max}/E_{\min} = 6$ et $20 \times \log 6 = 15,6$ dB.

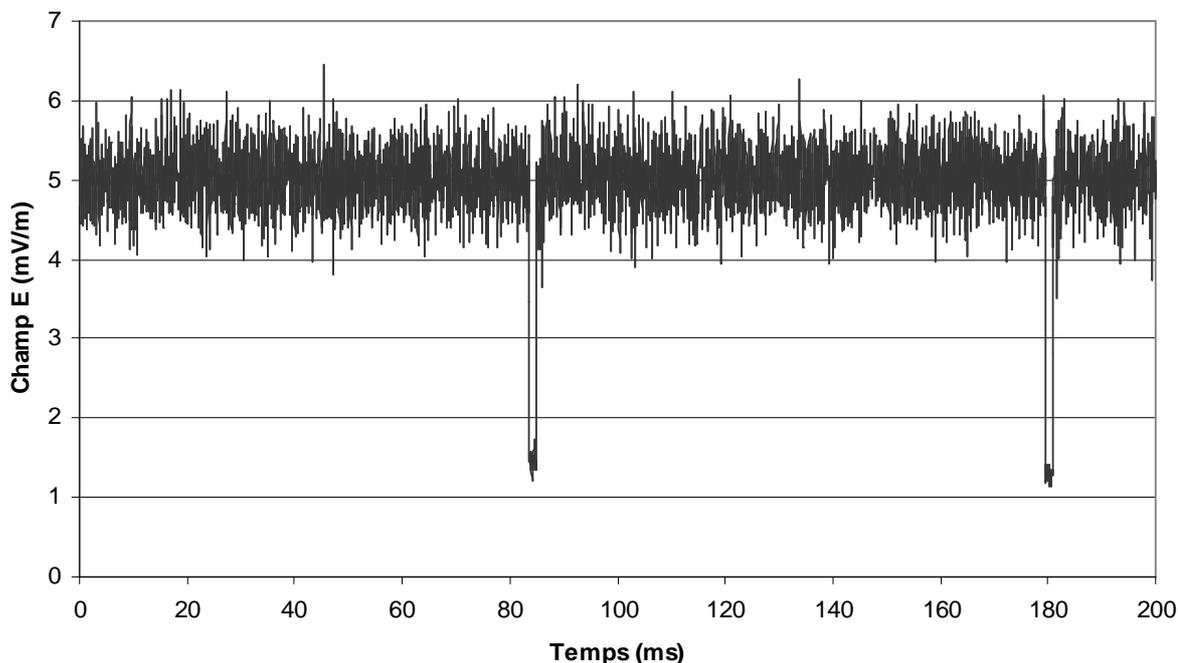
3.2.3. Télévision analogique

Les figures 9 et 10 représentent un exemple de signal émis par un émetteur de télévision analogique (enregistré à Bruxelles, porte de Namur). On constate qu'il subit d'importantes variations d'amplitude, notamment en raison des impulsions de synchronisation. En particulier, la figure 9 montre une chute du signal (exprimé en V/m) d'environ 85%, ce qui correspond⁹ à 16,5 dB. Le rayonnement des émetteurs de télévision analogique présente les caractéristiques d'un signal pulsé selon les critères établis au paragraphe 2.6. C'est d'ailleurs un fait généralement admis (voir notamment [AFSSE 2003] page 16 et [CSS – avis 8194] page 7).

Etant donné qu'il ne reste qu'un émetteur de télévision analogique¹⁰ dans la Région de Bruxelles-Capitale, il n'est pas pertinent d'analyser le cumul, en un lieu donné, de différentes composantes dans cette bande de fréquences.

3.2.4. Diffusion audio numérique DAB (Digital Audio Broadcasting)

La figure 18, obtenue lors d'une mesure à Bruxelles, montre que l'amplitude de la porteuse varie de quelques pourcents autour d'une valeur moyenne avec des interruptions toutes les 96 ms environ. Ces interruptions périodiques, d'une durée de 2,543 ms, permettent la synchronisation en début de chaque *frame*¹¹. Elles correspondent à une chute du signal (exprimé en V/m) d'environ 75%, ce qui équivaut à une douzaine¹² de dB. Selon les critères établis au paragraphe 2.6, le rayonnement des émetteurs DAB est incontestablement de type pulsé.



**Figure 18 : Mesure de l'enveloppe moyenne du rayonnement d'émetteur DAB
(fréquence centrale : 226 MHz – filtre : 1 MHz – résolution : 52 μ s)**

⁹ Selon la figure, $E_{\max} \approx 20$ et $E_{\min} \approx 3$. Par conséquent, $E_{\max}/E_{\min} = 6,7$ et $20 \times \log 6,7 = 16,5$ dB.

¹⁰ Il s'agit de TV Bruxelles dont l'antenne se trouve sur le toit de The Hotel qui est situé Boulevard de Waterloo.

¹¹ « Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers – ETSI EN 300 401 V1.4.1 (2006-06)

¹² Selon la figure, $E_{\max} \approx 5$ et $E_{\min} \approx 1,2$. Par conséquent, $E_{\max}/E_{\min} = 4,2$ et $20 \times \log 4,2 = 12,4$ dB.

Le standard DAB+ est une amélioration du DAB qui utilise un format de compression des données audio plus performant. Existe également le standard T-DMB qui permet de diffuser de la vidéo en plus de l'audio. Les standards DAB, DAB+ et T-DMB diffèrent par le codage, mais les caractéristiques temporelles du signal sont inchangées. Ainsi, ces trois standards émettent les mêmes signaux dont le caractère pulsé est une caractéristique commune.

On notera qu'il n'y a généralement, dans une zone donnée, qu'une seule porteuse allouée à la DAB, de sorte qu'il est inutile de considérer le cumul des rayonnements de plusieurs émetteurs de ce type.

3.2.5. Télévision numérique DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*)

L'enveloppe du rayonnement émis par les antennes de télévision numérique par liaisons hertziennes terrestres est représentée aux figures 19 et 20 (mesures effectuées à Bruxelles) pour des durées différentes. On constate la présence de brèves interruptions dont la durée est de quelques centaines de nanosecondes, c'est-à-dire quelques centaines de périodes de la porteuse (1,5 ns dans le cas de la figure 19).

Ce phénomène s'explique par le fait que la modulation OFDM (*orthogonal frequency division multiplexing*) utilisée par le standard DVB-T consiste à transmettre un ensemble de sous-porteuses dans la bande de fréquences allouée au canal de transmission. Le résultat de l'addition de ces sous-porteuses, dont les fréquences sont proches, subit d'importantes variations pour les mêmes raisons que celles exposées au paragraphe 2.5 concernant l'addition de porteuses de plusieurs émetteurs de radiodiffusions FM.

Les interruptions du rayonnement des émetteurs DVB-T se produisent à une cadence irrégulière. Selon les critères établis au paragraphe 2.6, ces rayonnements ne sont pas pulsés.

Remarquons que plusieurs signaux DVB-T peuvent être présents au même endroit. C'est le cas à Bruxelles où l'on reçoit la porteuse de la RTBF et celle de la VRT. Il est toutefois clair que les chutes d'amplitude dues à une addition de rayonnements seraient très brèves comme cela a été expliqué dans le cas des émetteurs de radiodiffusions FM.

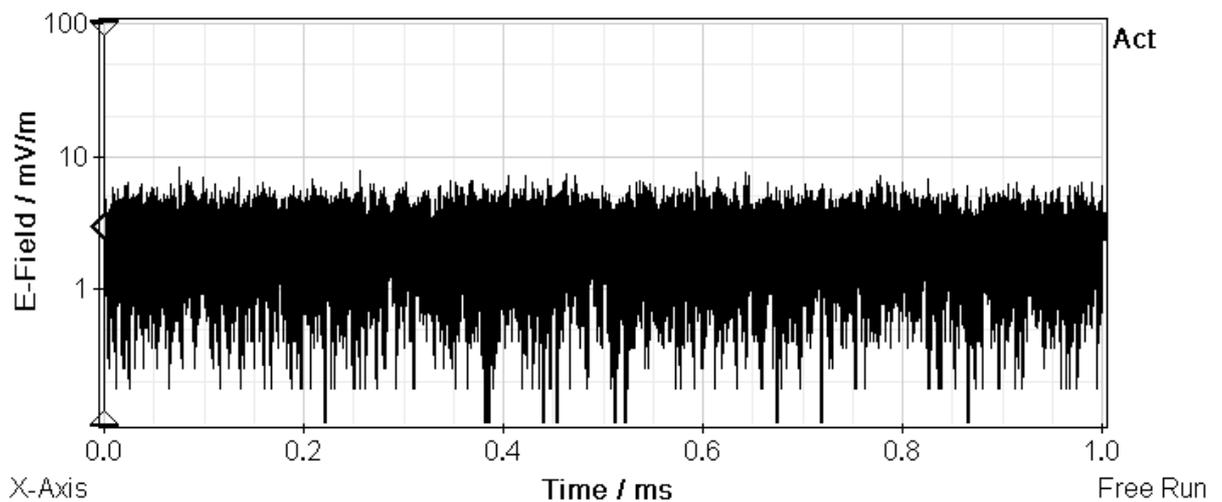
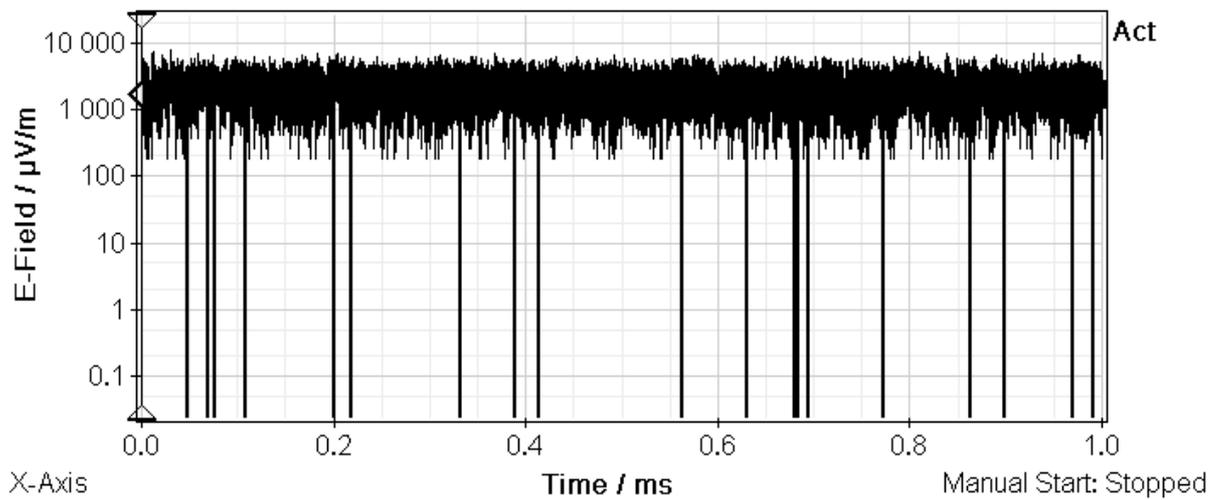
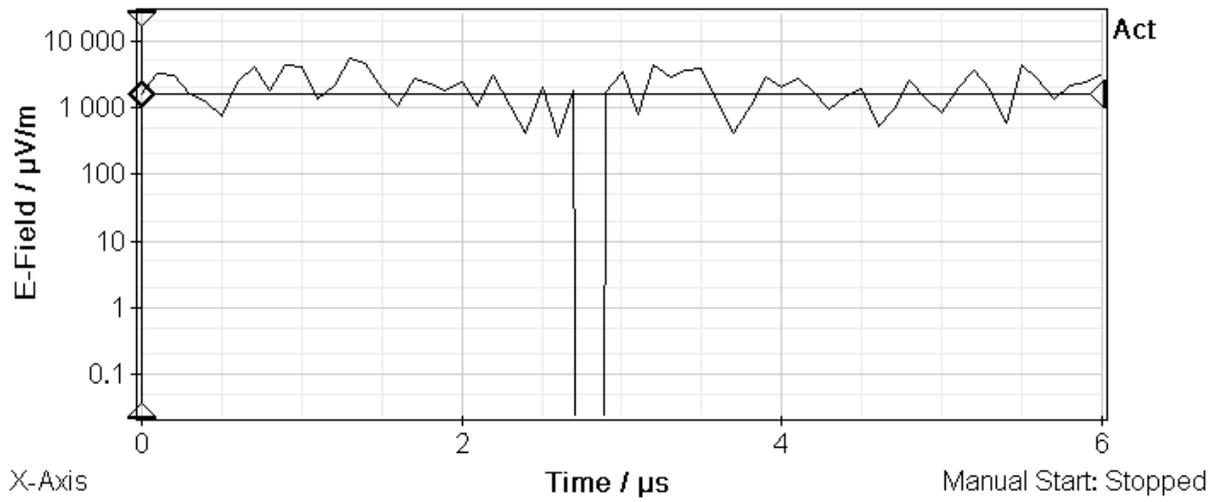


Figure 19 : Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'un émetteur DVB-T
(fréquence centrale : 650 MHz – filtre : 10 MHz – résolution : 100 ns)

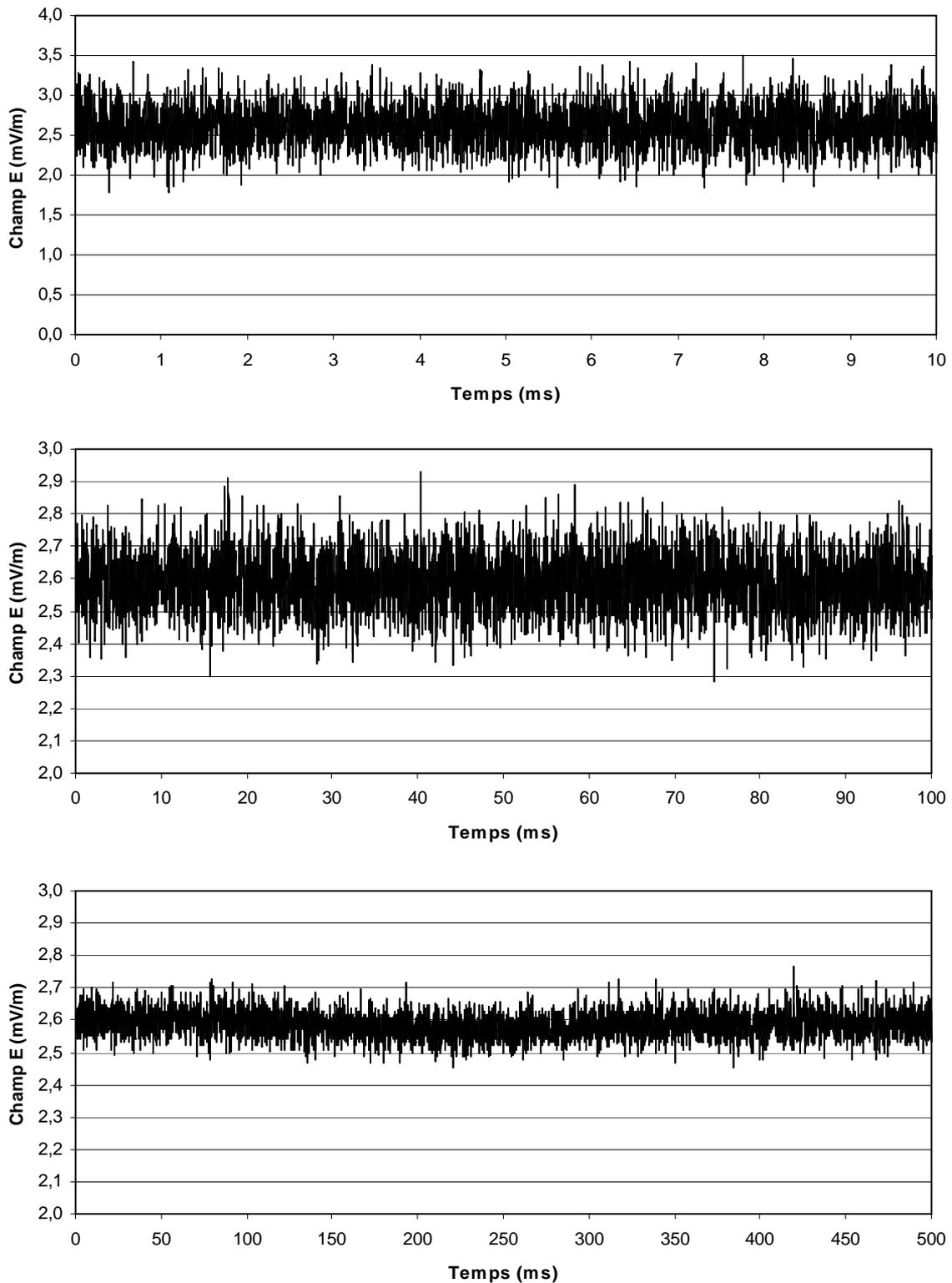


Figure 20 : Mesure de l'enveloppe moyenne du rayonnement d'un émetteur DVB-T (fréquence centrale : 650 MHz – filtre : 10 MHz – résolution : 2,8 μ s, 25,2 μ s et 125,2 μ s)

3.2.6. Téléphonie mobile GSM et DCS 1800

Les antennes-relais de téléphonie mobile « 2G » émettent dans les bandes GSM (925-960 MHz) et DCS 1800 (1805-1880 MHz). Le standard GSM utilise le multiplexage temporel TDMA. Les porteuses BCCH sont interrompues périodiquement et doivent donc être considérées comme pulsées. La figure 11, ainsi que la figure 21 relative à l'enveloppe de la porteuse BCCH dans la bande du DCS 1800, illustrent ce principe.

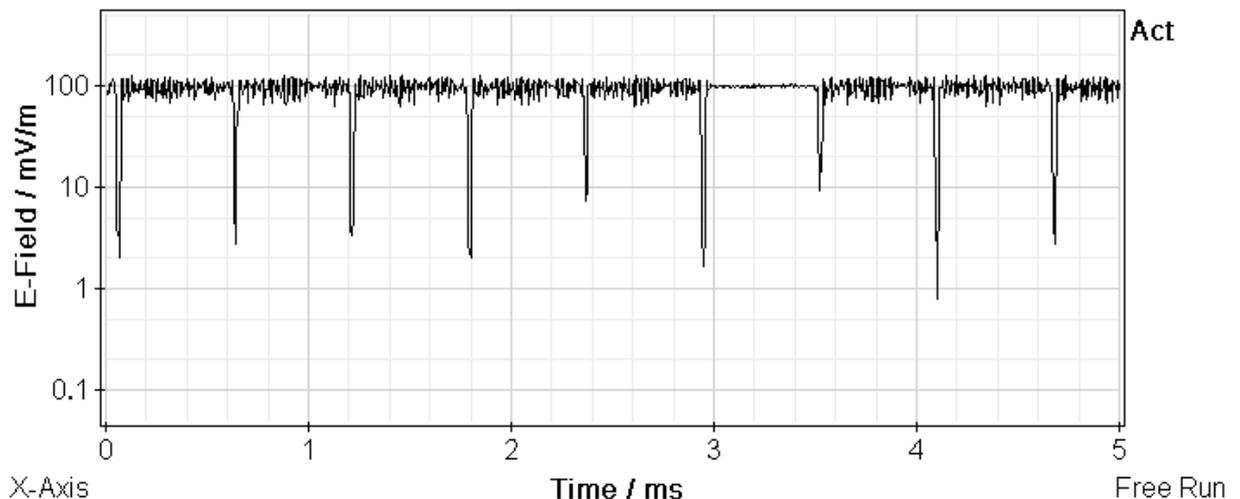


Figure 21 : Mesure de l'enveloppe de la porteuse BCCH d'une station de base DCS 1800 (fréquence centrale : 1826,8 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)

L'amplitude de la porteuse des stations de base GSM et DCS 1800 qui ne transmet que des canaux de trafic, représentée aux figures 22 et 23, n'est pas constante du fait que l'antenne n'émet que durant les *time slots* utilisés¹³. L'analyse des deux figures indique que les interruptions sont régulières, du moins pendant certaines durées (la succession des interruptions varie de manière intermittente).

Les interruptions sont toujours présentes si l'on considère le cumul de porteuses des deux types (celles qui transmettent le BCCH et celles réservées aux canaux de trafic). Selon les critères établis au paragraphe 2.6, les rayonnements des stations de base GSM et DCS 1800 sont de type pulsé.

Les standards HSCSD (*High-Speed Circuit-Switched Data*), GPRS (*General Packet Radio Service*), et EDGE (*Enhanced Data rate for GSM Evolution*) ont été développés afin d'accroître le débit de données transmises par les réseaux GSM de base jusqu'à des niveaux comparables au standard UMTS (3G). Pour cette raison, les réseaux répondant à ces standards d'extension sont désignés sous l'appellation « GSM étendu » ou « 2.5G ». Ils concernent l'électronique en amont de l'antenne et pas son rayonnement dont le caractère pulsé n'est pas affecté.

Les sites multi-opérateurs sont nombreux. Il est, de ce fait, pertinent de considérer le cumul dans la bande de fréquences d'émission des antennes-relais dans les zones où les rayonnements de plusieurs antennes s'additionnent. La figure 15 représente la mesure de l'évolution temporelle du cumul des contributions de différents opérateurs en un point où elles sont du même ordre. Ce cumul subit d'importantes chutes espacées de 577 μ s. On en conclut que, dans les zones exposées aux

¹³ L'amplitude du rayonnement durant ces *time slots* varie à cause du contrôle automatique de la puissance qui est réglée au minimum nécessaire pour assurer une connexion de qualité.

rayonnements de stations de base de plusieurs opérateurs, le caractère pulsé, selon la définition proposée au paragraphe 2.6, est encore observable¹⁴.

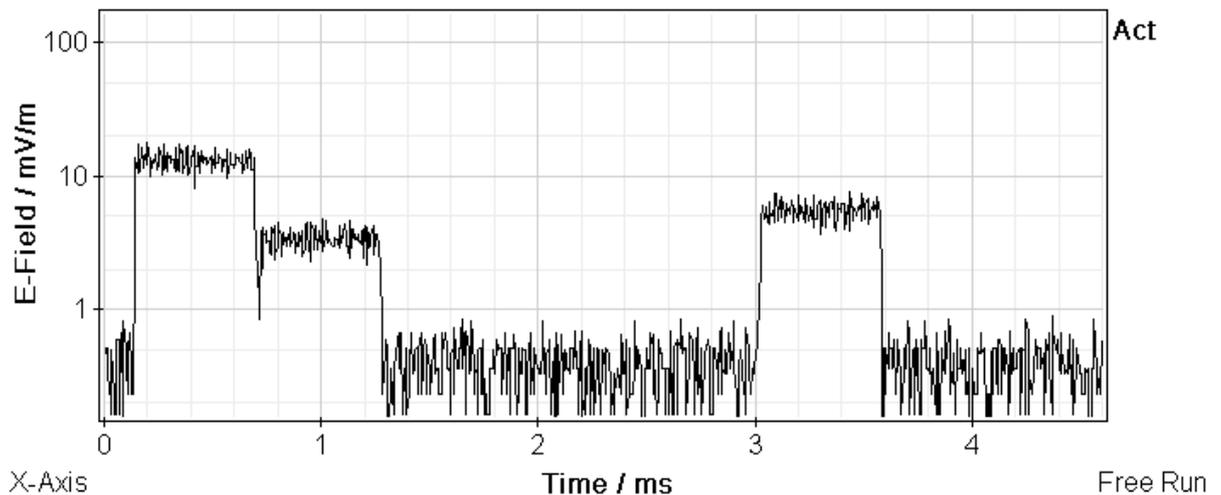


Figure 22 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse réservée aux canaux de trafic rayonnée par une station de base GSM (fréquence centrale : 948,6 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)

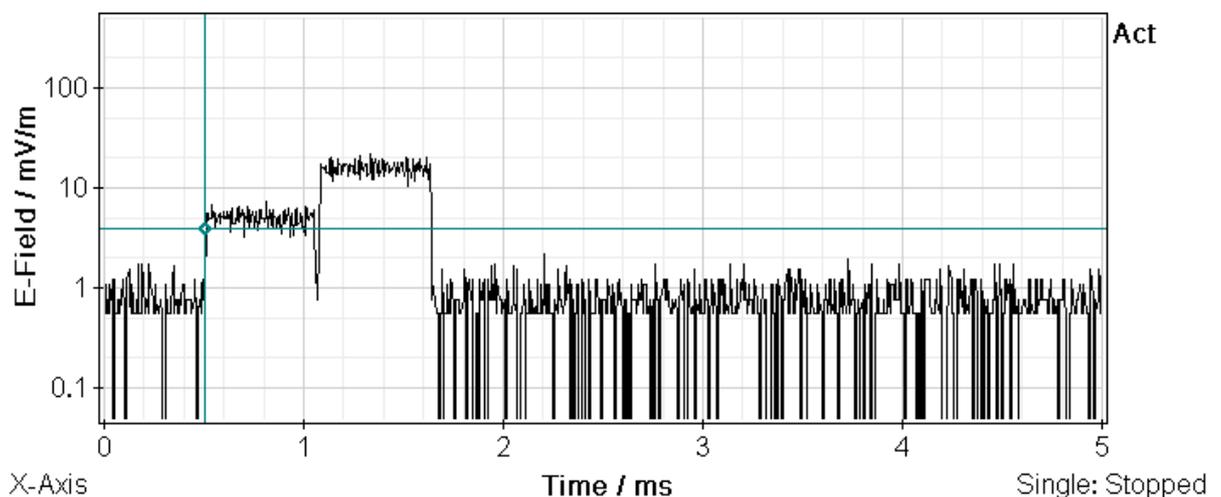


Figure 23 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse réservée aux canaux de trafic rayonnée par une station de base DCS 1800 (fréquence centrale : 1813,8 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)

3.2.7. Réseau GSM-R

Le GSM-R est un réseau réservé aux chemins de fer. En Belgique, il est déployé par la société B Holding. Ce réseau est conforme, en de nombreux points, au standard GSM. Il utilise notamment le

¹⁴ On pourrait s'attendre à davantage de chutes dans un intervalle de 577 μ s si les différents réseaux ne sont pas synchronisés. En fait, les signaux dominants masquent l'influence de ceux dont l'intensité est plus faible, ce qui explique que l'intervalle entre deux chutes reste égal à 577 μ s.

multiplexage temporel TDMA. La bande de fréquences allouée est comprise entre 921 MHz et 925 MHz, c'est-à-dire juste en dessous de la bande GSM.

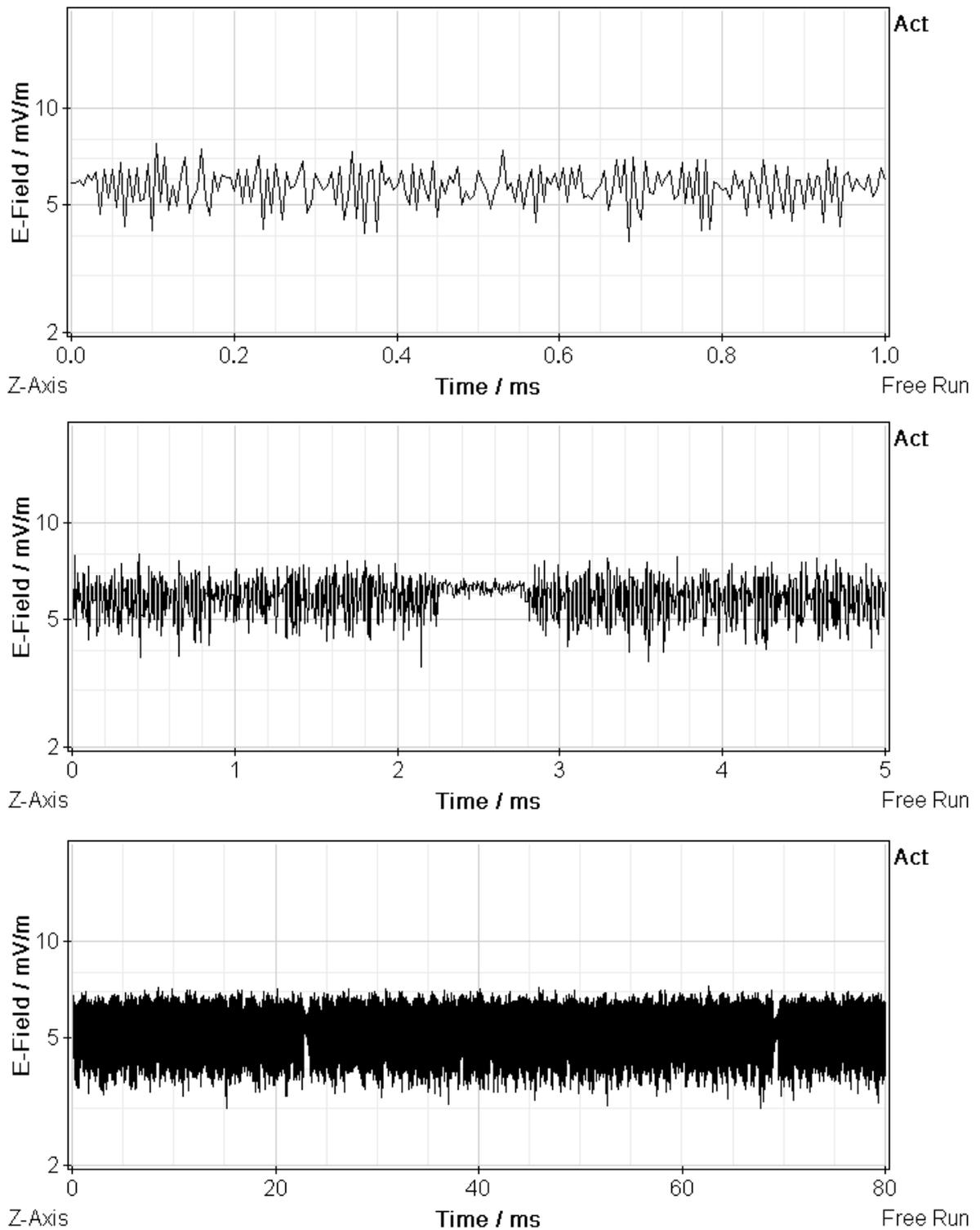


Figure 24 : Mesure de l'enveloppe de la porteuse BCCH rayonnée par une station de base GSM-R (Belgique - fréquence centrale : 923,6 MHz - filtre : 200 kHz - résolution : 5 μ s)

La figure 24 représente des mesures effectuées en Belgique, pendant différentes durées, de l'enveloppe de la porteuse BCCH. Cette enveloppe diffère de celle des réseaux GSM (figure 21), ce qui est tout à fait inattendu puisque les caractéristiques de la liaison radio de ces deux standards sont en principe identiques. Contactée par B Holding, la société Nokia Siemens Networks (fournisseur des stations de base du réseau GSM-R en Belgique) a confirmé la validité de l'enregistrement de la figure 24.

Des mesures similaires ont été effectuées à Hergenrath (frontière entre la Belgique et l'Allemagne) à proximité d'une station de base du réseau GSM-R allemand fournie par la société Kapsch Carrier Com. L'enregistrement, représenté à la figure 25, est identique à celle des réseaux GSM (figure 21). L'enveloppe du rayonnement pouvant différer en fonction du fournisseur du matériel, les résultats de la présente étude ne concernent que la version du GSM-R déployée en Belgique.

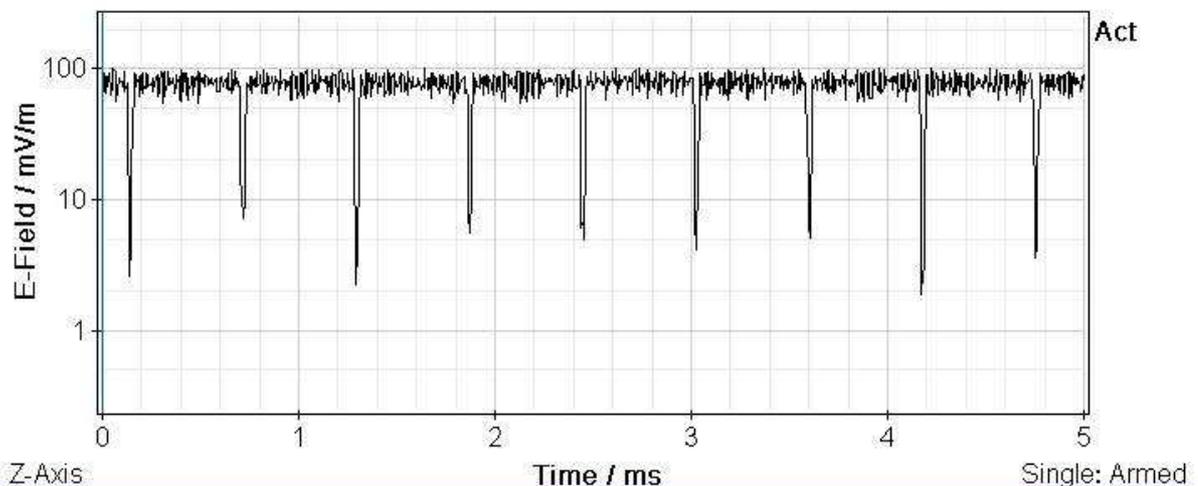


Figure 25 : Mesure de l'enveloppe de la porteuse BCCH rayonnée par une station de base GSM-R (Allemagne - fréquence centrale : 921,4 MHz – filtre : 200 kHz – résolution : 5 μ s)

L'enveloppe de la porteuse BCCH du réseau GSM-R belge ne présente aucune interruption, ce qui démontre que le multiplexage temporel n'implique pas nécessairement une extinction de la porteuse. Par contre, la porteuse réservée aux canaux de trafic est interrompue¹⁵ durant les *time slots* inoccupés. Si l'on considère le cumul d'une porteuse BCCH et d'une autre réservée aux canaux de trafic, les chutes d'amplitude n'atteindront que 3 dB, ce qui est inférieur au seuil de 10 dB nécessaire pour considérer qu'il y a interruption.

En conséquence, le signal GSM-R belge n'est pas pulsé selon les critères établis au paragraphe 2.6.

Par contre, selon ces mêmes critères, les rayonnements d'une station de base du réseau GSM-R allemand, telle que celle qui est située à Hergenrath, sont pulsés.

3.2.8. Réseau TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*)

Il s'agit d'un système professionnel de radio numérique mobile réservé aux services de secours et de sécurité. Il est géré par la société A.S.T.R.I.D. La bande de fréquences allouée en Belgique se situe entre 380 et 400 MHz.

¹⁵ Aucune mesure n'a malheureusement pu être effectuée étant donné que le trafic est insuffisant pour provoquer l'activation de cette porteuse.

Le système TETRA utilise un multiplexage temporel (TDMA). Pour rappel, nous avons vu que ce procédé pouvait produire des interruptions de l'émission radioélectrique, mais que ce n'était pas le cas pour la porteuse BCCH du réseau GSM-R en Belgique. Il en est de même pour le TETRA, comme le montrent les figures 26 et 27. Cependant, elles font apparaître des interruptions périodiques du rayonnement de la porteuse MCCH¹⁶ (*Multidestination Control Channel*) qui ne sont pas dues à la modulation, au multiplexage ou à la synchronisation. En fait, la station de base cesse d'émettre pendant 6 ms toutes les 4,08 s afin de préserver la linéarité des amplificateurs, les non-linéarités pouvant produire des interférences indésirables. Un arrêt de 6 ms correspond à 2,7 millions de fois la période de la porteuse.

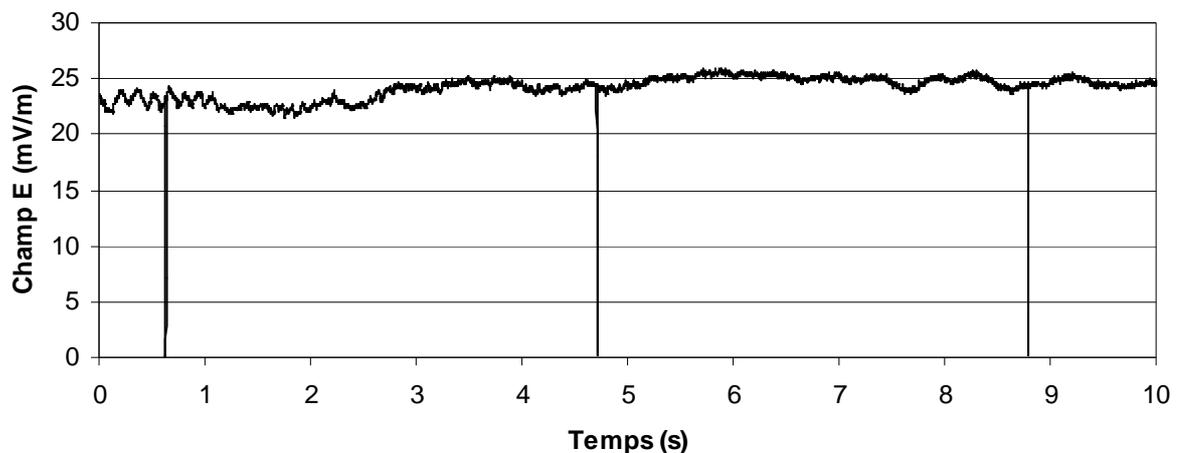


Figure 26 : Mesure de l'enveloppe moyenne d'une porteuse MCCH d'une station de base TETRA (fréquence centrale : 390,86 MHz – filtre : 50 kHz – résolution : 2,56 ms)

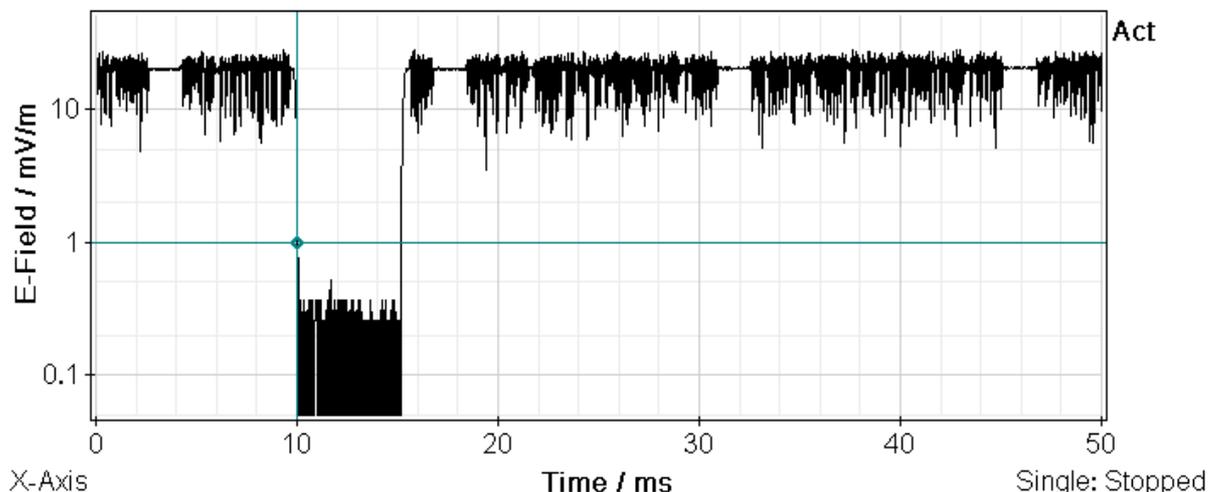


Figure 27 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse MCCH d'une station de base TETRA (fréquence centrale : 390,86 MHz – filtre : 50 kHz – résolution : 20 µs)

La figure 28 montre les variations d'amplitude du cumul des différentes porteuses TETRA sur le même site. En particulier, on peut voir que les chutes de ce cumul, répétées toutes les 4,08 s, confirment que les différentes porteuses sont synchronisées. Selon les critères établis au paragraphe 2.6, le rayonnement des stations de base TETRA est de type pulsé.

¹⁶ La porteuse MCCH transmet le canal de contrôle. Elle joue le même rôle que la porteuse BCCH dans les réseaux GSM.

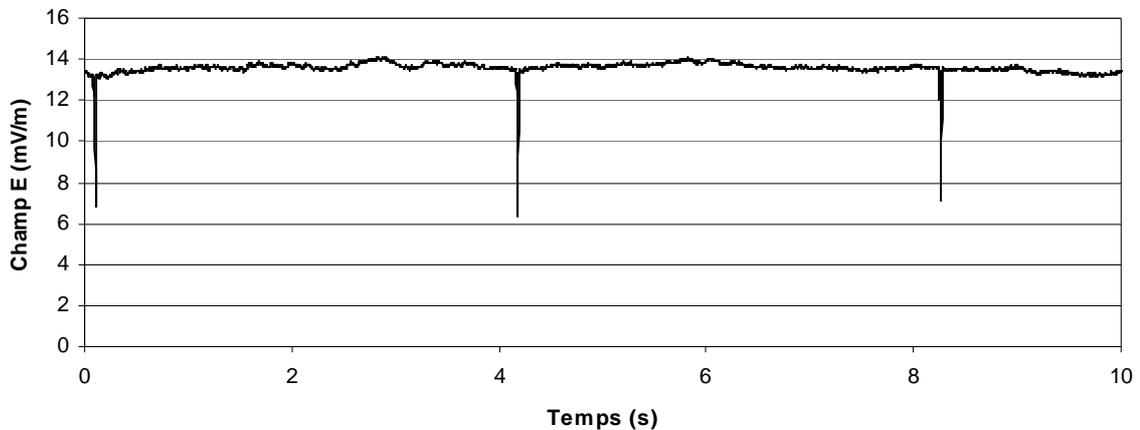


Figure 28 : Mesure de l'enveloppe moyenne du cumul des rayonnements de plusieurs porteuses TETRA
(fréquence centrale : 393 MHz – filtre : 6,4 MHz – résolution : 5 ms)

Remarquons enfin que les radios mobiles TETRA n'émettent et ne reçoivent que durant un *time slot* sur quatre (au lieu d'un *time slot* sur huit pour les réseaux GSM). Le signal émis par un appareil mobile TETRA est donc pulsé au même titre que celui produit par un téléphone GSM 2G.

3.2.9. Téléphonie mobile UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) – Variante FDD

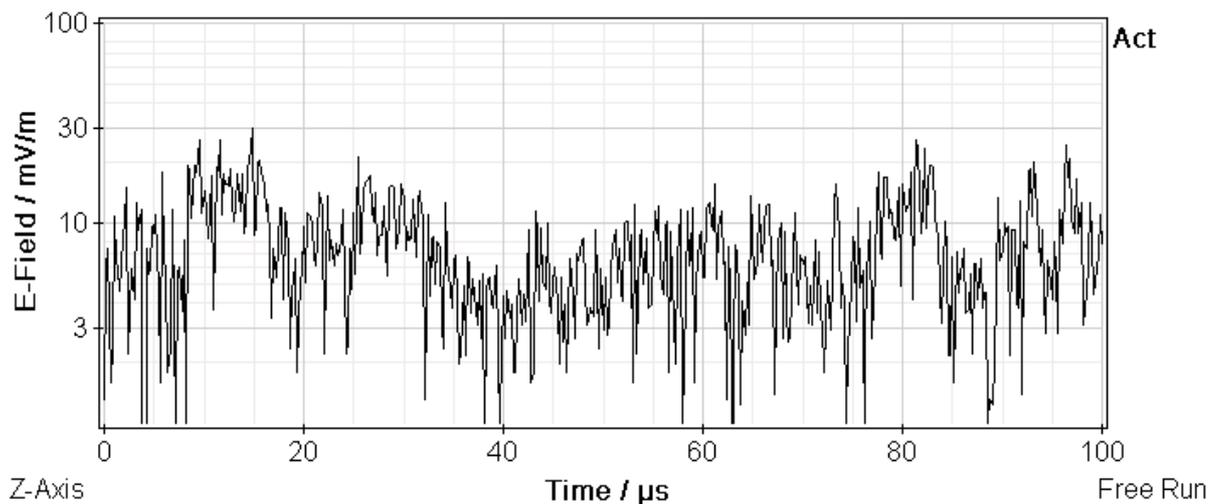
Les réseaux de téléphonie de troisième génération sont souvent désignés sous le vocable « réseaux 3G » ou « UMTS ». Il a été mentionné au paragraphe 2.4 que ces réseaux, du moins leur variante FDD¹⁷, faisaient appel à un duplexage fréquentiel, ce qui signifie que l'antenne-relais et le téléphone portable émettent dans des bandes de fréquences distinctes. Les stations de base émettent dans la gamme comprise entre 2110 et 2170 MHz¹⁸.

En particulier, toutes les communications du réseau d'un même opérateur peuvent utiliser simultanément la même fréquence, l'identification se faisant par un code qui leur est attribué. Cette technique est appelée « multiplexage par répartition de code » ou CDMA (*code division multiple access*).

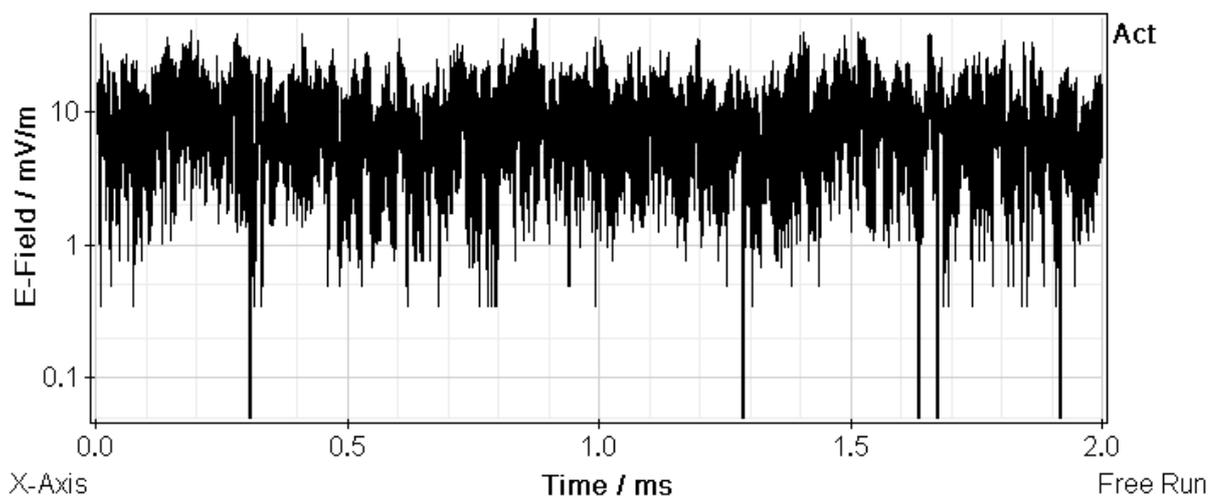
Les rayonnements des différentes communications, auxquels se superposent des canaux de contrôle, occupent une bande de fréquences de 5 MHz. Selon les besoins, des bandes de fréquences additionnelles (de 5 MHz) sont utilisées. Une telle bande de fréquences peut par conséquent contenir plusieurs porteuses pouvant éventuellement provenir de différentes antennes. C'est la raison pour laquelle les légendes des figures relatives aux enveloppes des rayonnements des stations de base des réseaux UMTS FDD seront formulées comme suit : « *Mesure de l'enveloppe dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD) ...* » et non pas « *Mesure de l'enveloppe du rayonnement d'une porteuse ...* » comme cela a été fait pour la plupart des standards examinés.

¹⁷ Aussi appelée « R'99 ».

¹⁸ Dans certaines zones à faible densité de population, une porteuse est parfois émise dans la bande de fréquences allouée au GSM (entre 925 et 960 MHz). L'intervalle de fréquences nécessaire à l'utilisation de l'UMTS étant de 5 MHz, ce choix limite sans l'exclure l'utilisation simultanée avec un réseau GSM classique. Émettre une porteuse UMTS dans la bande GSM est une éventualité qui est en principe exclue dans la Région de Bruxelles-Capitale.



**Figure 29 : Mesure de l'enveloppe dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2162 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 200 ns)**



**Figure 30 : Mesure de l'enveloppe dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2112,6 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 200 ns)**

Les figures 29 à 34 représentent la mesure de l'enveloppe du rayonnement UMTS FDD dans une bande de fréquences de 5 MHz. Elles font apparaître des chutes d'amplitude irrégulières, mais de durée très brève, puisqu'elles ne correspondent généralement qu'à un seul point du graphique. La résolution temporelle de la figure 29 étant de 200 ns, la durée de la chute est du même ordre. Puisque la fréquence est proche de 2 GHz (d'où une période de 0,5 ns), la durée de la chute équivaut à environ 400 fois la période du rayonnement. Ces variations sont semblables à celles de la figure 13 qui correspond au cumul des rayonnements de plusieurs émetteurs de radiodiffusion FM. Tout comme dans le cas du rayonnement des émetteurs DVB-T, les chutes sont dues à l'addition de plusieurs porteuses qui occupent une bande de fréquence relativement large. De ces observations et selon les critères définis au paragraphe 2.6, il résulte que les rayonnements des antennes émettrices UMTS 3G (variante FDD) ne sont pas pulsés. On notera que ce résultat rejoint celui de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale publié en 2003 (page 11 du rapport [AFSSE 2003]). Signalons également que ce caractère non pulsé est indépendant du niveau de trafic et est conservé lorsqu'il n'y a que les canaux de contrôles qui sont émis.

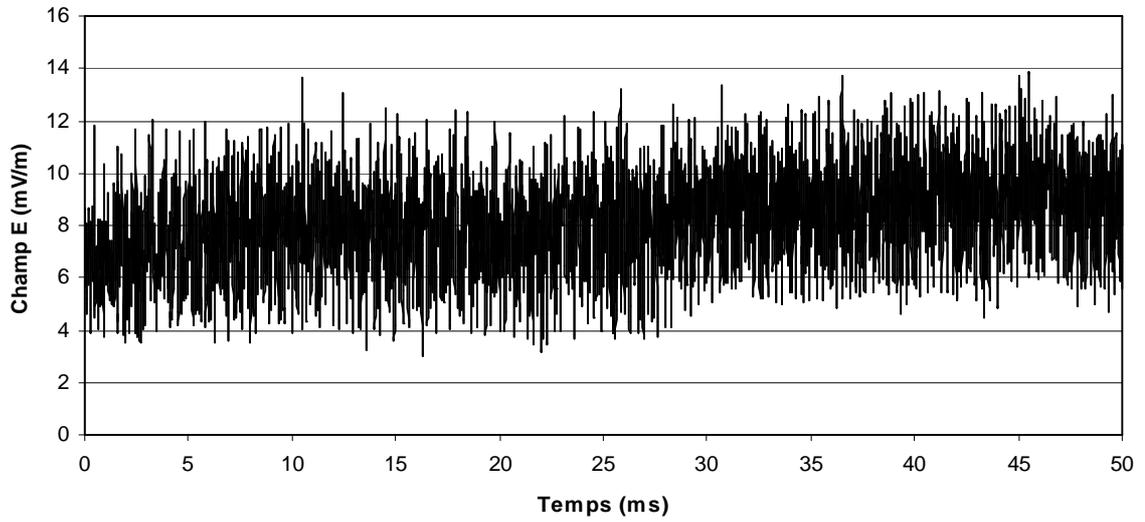


Figure 31 : Mesure de l'enveloppe moyenne
dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2112,6 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 12,8 μ s)

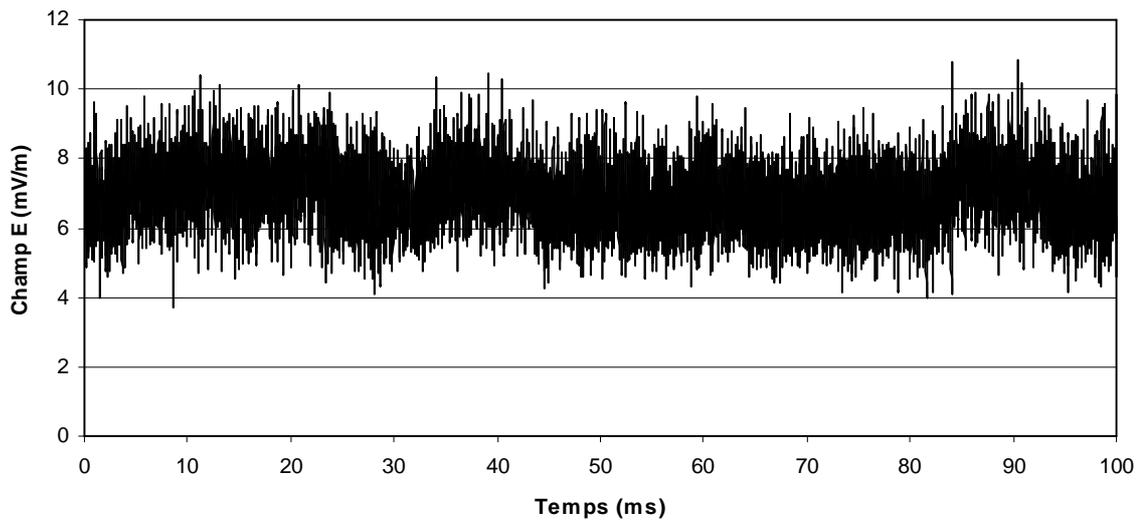
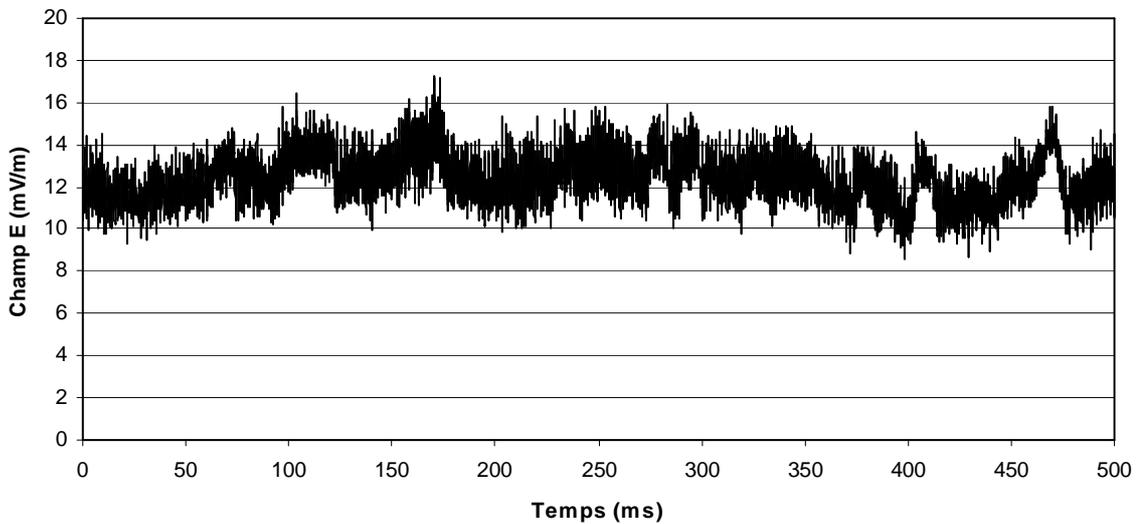
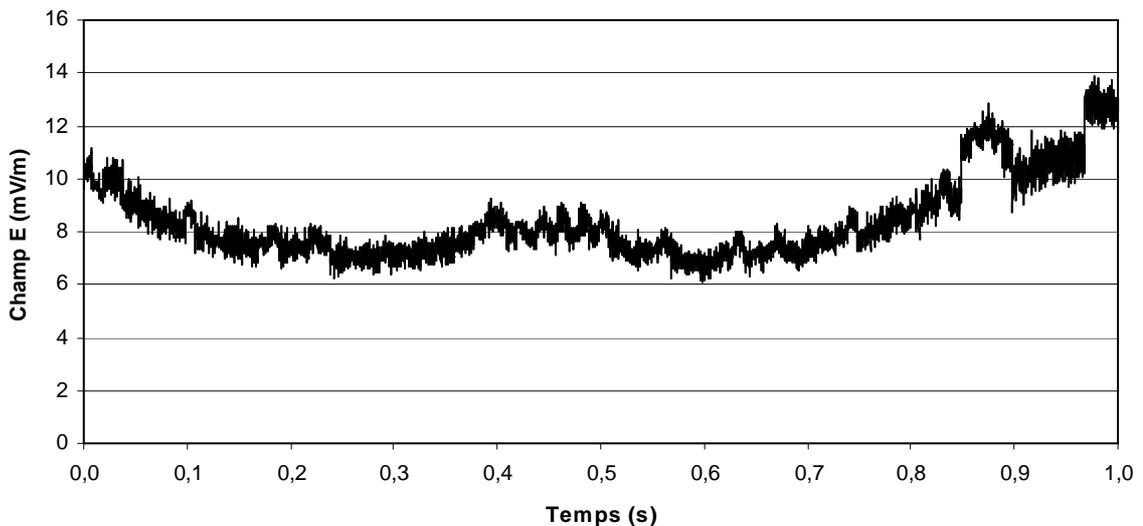


Figure 32 : Mesure de l'enveloppe moyenne
dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2162 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 25,6 μ s)



**Figure 33 : Mesure de l'enveloppe moyenne
dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2112,6 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 125,6 μ s)**



**Figure 34 : Mesure de l'enveloppe moyenne
dans une bande de 5 MHz allouée à l'UMTS (FDD)
(fréquence centrale : 2112,6 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 250,4 μ s)**

3.2.10. Téléphonie mobile UMTS HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*)

L'UMTS HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) est une évolution de l'UMTS 3G (également appelée « 3.5G », « 3G+ » ou encore « turbo 3G »). Elle permet un accroissement du débit des données, en modifiant par exemple la modulation en fonction de l'utilisation et de la qualité du signal, passant de la QPSK aux modulations 16QAM et 64QAM (voir paragraphe 2.3). Cette technologie est déjà en service sur de nombreux sites en Belgique. Les figures 35 et 36 représentent la mesure de l'enveloppe des signaux dans une bande de fréquences de 5 MHz réservée uniquement à la transmission de signaux UMTS HSDPA. Cette mesure a été prise durant le téléchargement de fichiers de grande taille effectué depuis un local de la société MOBISTAR à Bruxelles.

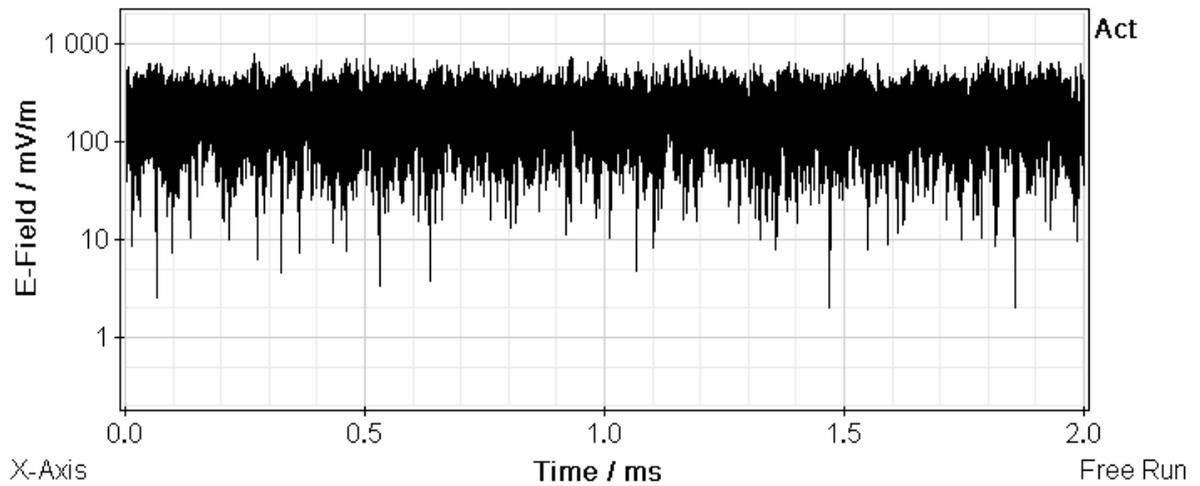


Figure 35 : Mesure de l'enveloppe dans une bande de 5 MHz réservée à l'UMTS HSDPA (fréquence centrale : 2166,2 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 200 ns)

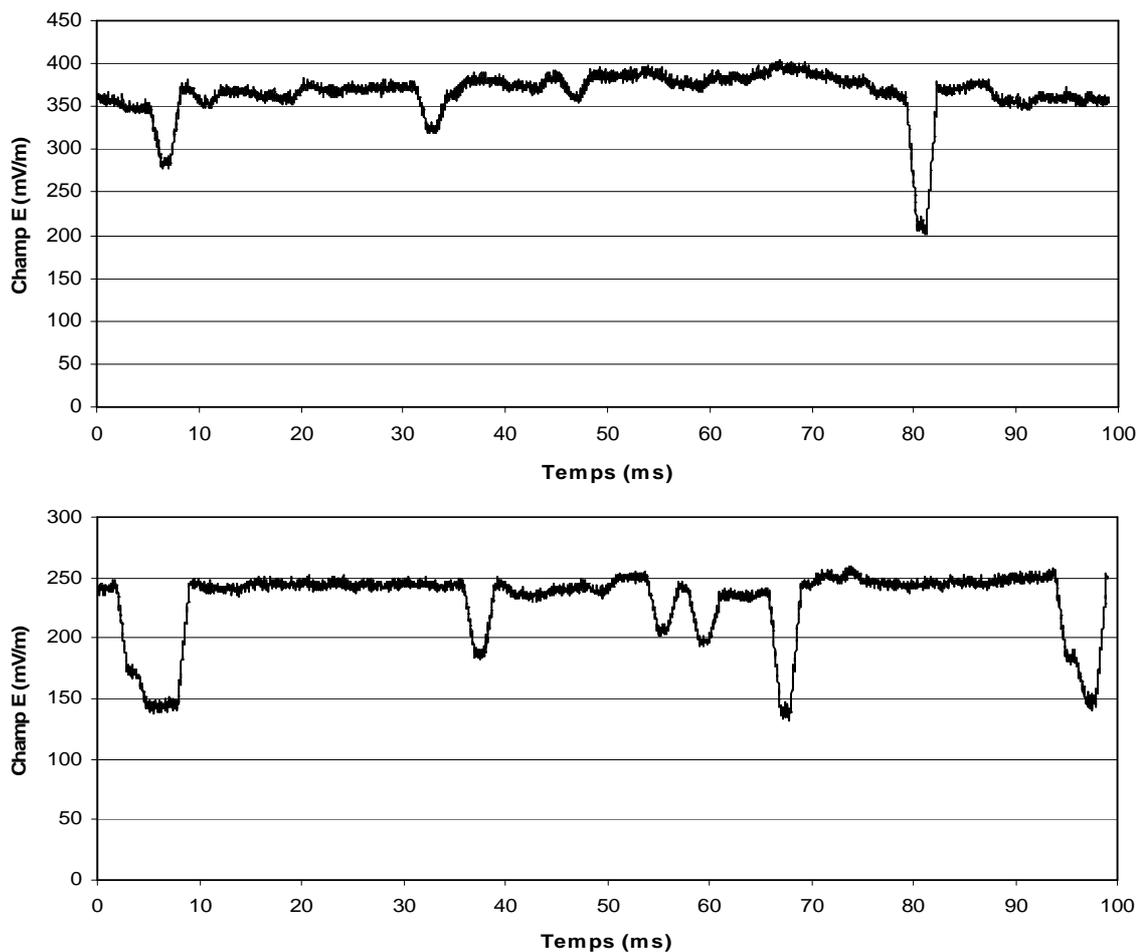


Figure 36 : Mesures de l'enveloppe moyenne dans une bande de 5 MHz réservée à l'UMTS HSDPA (fréquence centrale : 2166,2 MHz – filtre : 5 MHz – résolution : 1024 μ s)

On constate que la mesure de l'enveloppe du rayonnement, représentée à la figure 35, est semblable à celle de l'UTMS 3G. Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3, les modulations telles que 16QAM et 64QAM produisent des variations de l'enveloppe de la porteuse. Ces variations n'apparaissent toutefois pas sur la figure 35 du fait que la bande de fréquences de 5 MHz de largeur est occupée par plusieurs porteuses qui sont codées différemment. Il en résulte que les variations d'enveloppe des différentes porteuses se neutralisent mutuellement, du moins dans une large mesure. C'est pour cette raison que l'enveloppe du signal résultant a l'apparence d'un bruit de fond.

Sur une durée d'observation de 100 ms, il apparaît, de temps à autres, comme illustré à la figure 36 des variations de l'enveloppe moyenne¹⁹ de 4 ou 5 dB et de durée très irrégulière. Sur base de ce résultat et des critères établis au paragraphe 2.6, on peut en conclure, que le rayonnement émis par les antennes UMTS HSDPA ne sont pas pulsés.

On signalera que les enregistrements des figures 35 et 36 ont été réalisés dans une bande de fréquences exclusivement réservée à l'UMTS HSDPA. En pratique, la même antenne (ou une autre toute proche) est également utilisée pour rayonner l'UMTS 3G (soit dans la même bande de fréquences de 5 MHz, soit dans une autre toute proche). Si l'on considère l'addition de ces deux rayonnements (UMTS 3G + UMTS HSDPA), les variations du cumul ne sont plus que de l'ordre de 2 dB. Elles deviennent même imperceptibles (noyées dans un signal ressemblant à un bruit de fond) lorsque l'on prend en compte le cumul de l'ensemble des signaux dans la bande de fréquences allouée à l'UMTS (entre 2110 et 2170 MHz). En vertu des critères établis au paragraphe 2.6, il apparaît que l'exposition où se superposent des rayonnements UMTS 3G et UMTS HSDPA ne présente pas un caractère pulsé.

3.2.11. LTE (Long Term Evolution)

La technologie LTE est la dernière évolution de la téléphonie mobile qui sera prochainement disponible en Belgique. Elle est aussi appelée « technologie 4G » ou « *LTE Advanced* ». Le système LTE peut être utilisé dans différentes gammes de fréquences et la largeur du canal (bande de fréquences nécessaire) peut être adaptée aux besoins locaux. Bien qu'il soit considéré comme faisant partie de la norme UMTS, son fonctionnement en est assez différent. La figure 37 représente une mesure de l'enveloppe de la porteuse effectuée près d'une station de base²⁰ (située à Heverlee) que la société BELGACOM utilise pour des essais. On observe que le rayonnement de l'antenne présente un caractère pulsé en l'absence de transfert de données (seuls les canaux de contrôle sont transmis). On note également que la durée d'extinction de la porteuse n'est pas constante. Par contre, l'antenne-relais émet un signal continu lors du téléchargement d'un fichier de grande taille, comme le montre la figure 38. Considérant les critères définis au paragraphe 2.6, le rayonnement des antennes LTE est pulsé, étant donné la présence d'interruptions intermittentes de durée relativement longue.

¹⁹ Selon la figure, $E_{\max} \approx 250$ et $E_{\min} \approx 140$. Par conséquent, $E_{\max}/E_{\min} = 1,8$ et $20 \times \log 1,8 = 5$ dB.

²⁰ Cette station est considérée comme « compatible 3.9G » car elle ne satisfait pas encore certaines fonctionnalités, au niveau du réseau, du standard 4G. Les différences en question ne concernent pas la liaison radioélectrique.

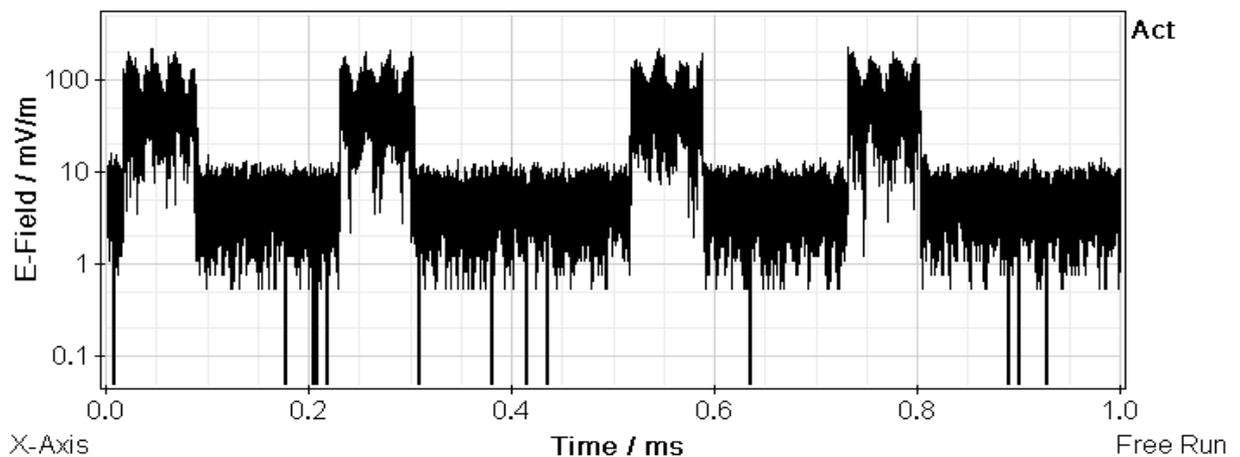


Figure 37 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse rayonnée par une station de base LTE en l'absence de trafic (fréquence centrale : 1815 MHz – filtre : 10 MHz – résolution : 100 ns)

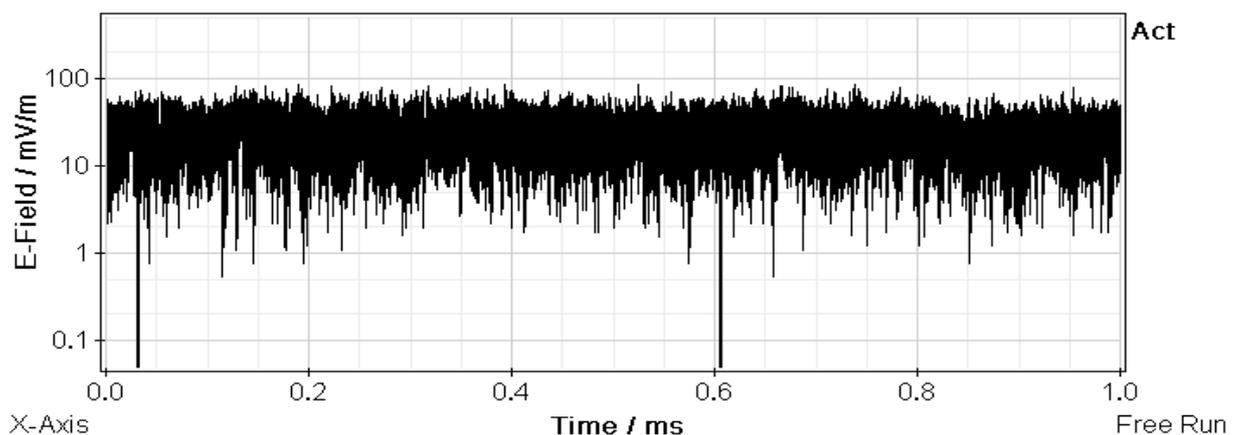


Figure 38 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse rayonnée par une station de base LTE pendant le téléchargement de fichiers de grande taille (fréquence centrale : 1815 MHz – filtre : 10 MHz – résolution : 100 ns)

3.2.12. Wi-Fi (IEEE 802.11)

Un réseau Wi-Fi permet l'interconnexion d'appareils informatiques tels qu'ordinateurs, serveurs, ou PDAs. Les différents appareils communiquent entre eux par liaison sans fil selon un ensemble de protocoles définis par une norme portant la référence IEEE 802.11. L'évolution la plus récente (802.11n) permet l'utilisation séparée ou simultanée, selon les cas, de fréquences dans deux bandes distinctes (autour de 2,4 et 5,5 GHz environ).

Les figures 39 et 40 montrent la structure des impulsions dont la durée dépend de la taille des fichiers en cours de chargement. L'enregistrement a été réalisé près d'une borne Wi-Fi conforme au standard IEEE 802.11n. Ces impulsions intermittentes révèlent le caractère pulsé du rayonnement émis par les bornes Wi-Fi.

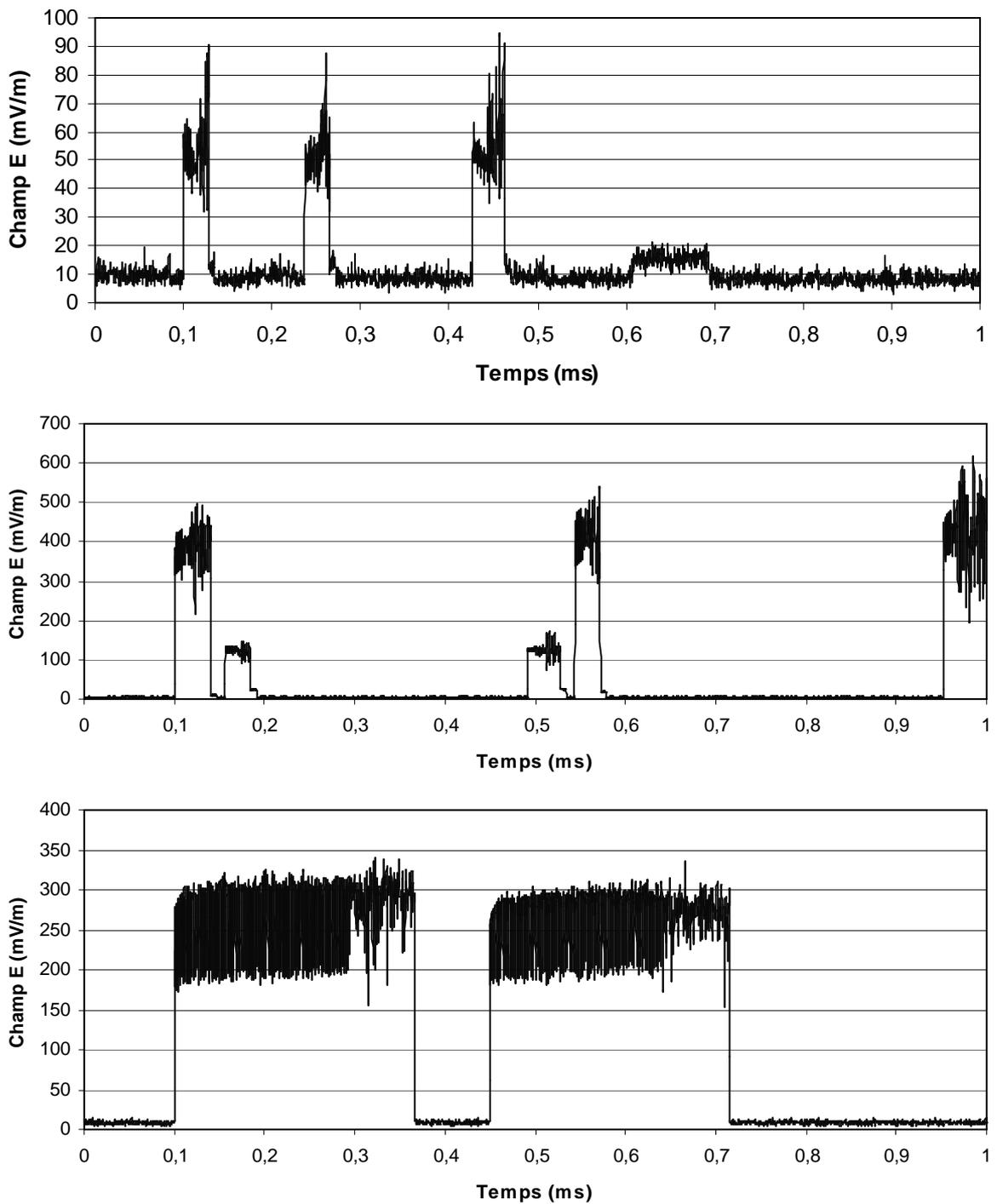


Figure 39 : Mesures de l'enveloppe moyenne d'une porteuse rayonnée par une borne Wi-Fi
 (fréquence centrale : 2,437 GHz – filtre : 20 MHz – résolution : 400 ns)

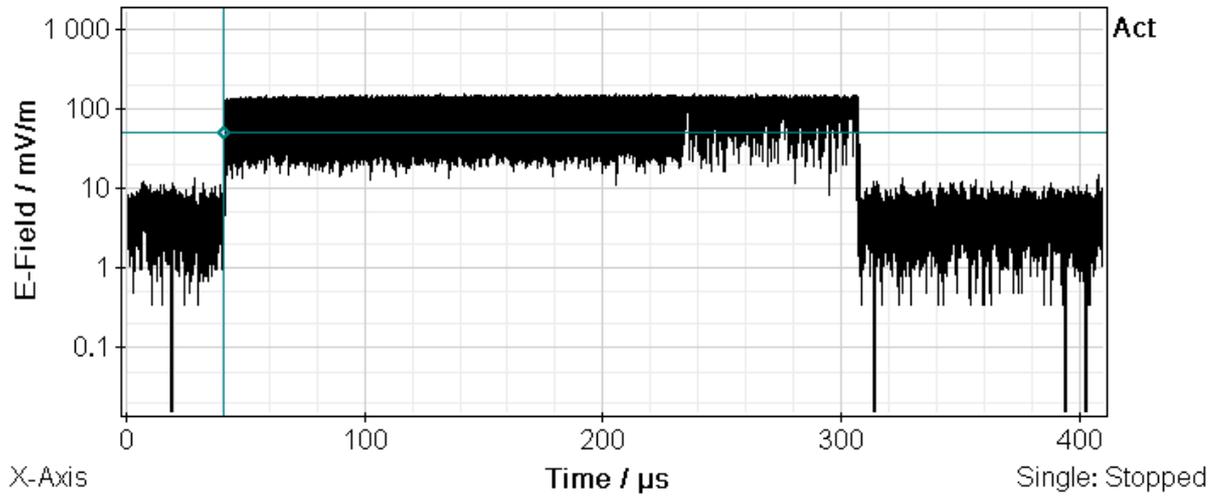


Figure 40 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse rayonnée par une borne Wi-Fi

(fréquence centrale : 2,437 GHz – filtre : 20 MHz – résolution : 50 ns)

3.2.13. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

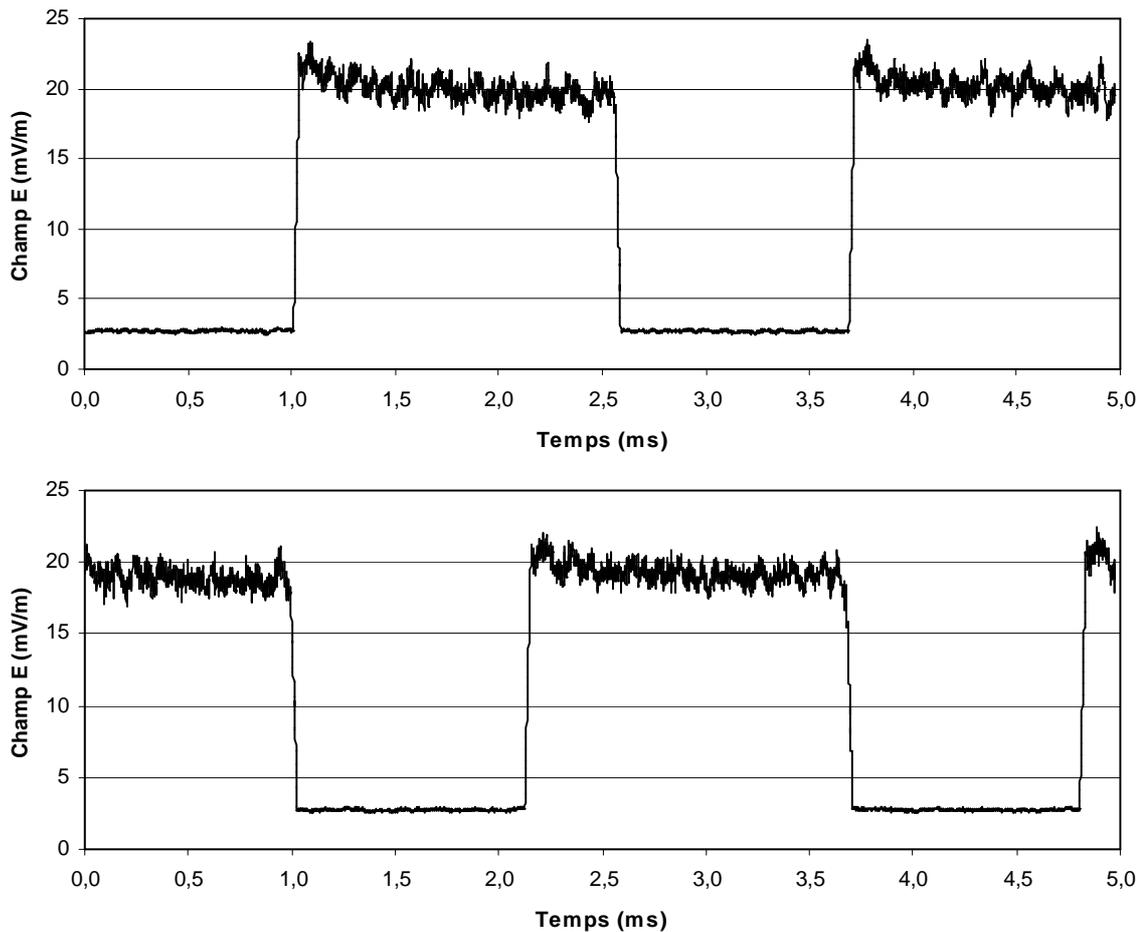


Figure 41 : Mesures de l'enveloppe moyenne d'une porteuse rayonnée

par une station de base WiMAX

(fréquence centrale : 3,58 GHz – filtre : 20 MHz – résolution : 28 µs)

Le standard WiMAX désigne un autre système de télécommunications sans fil permettant l'accès à Internet. Un réseau WiMAX autorise des transferts de données à haut débit et couvre des zones plus grandes que les points d'accès Wi-Fi (via des antennes placées en hauteur, sur des bâtiments ou des châteaux d'eau par exemple). La plage des fréquences permises par la norme est grande (entre 2 et 66 GHz). Le standard WiMAX utilise le multiplexage temporel par répartition dans le temps (TDD). La figure 41 montre la mesure de l'enveloppe d'une porteuse WiMAX prise à deux moments différents pendant l'échange de messages. On y distingue des impulsions de durée constante. Inversement, en l'absence de trafic, il n'y a plus aucune émission comme le montre la figure 42. Les impulsions et interruptions apparaissent donc de manière intermittente (c'est-à-dire durant les phases de transfert). Sur base des critères définis au paragraphe 2.6, le rayonnement des antennes WiMAX est pulsé.

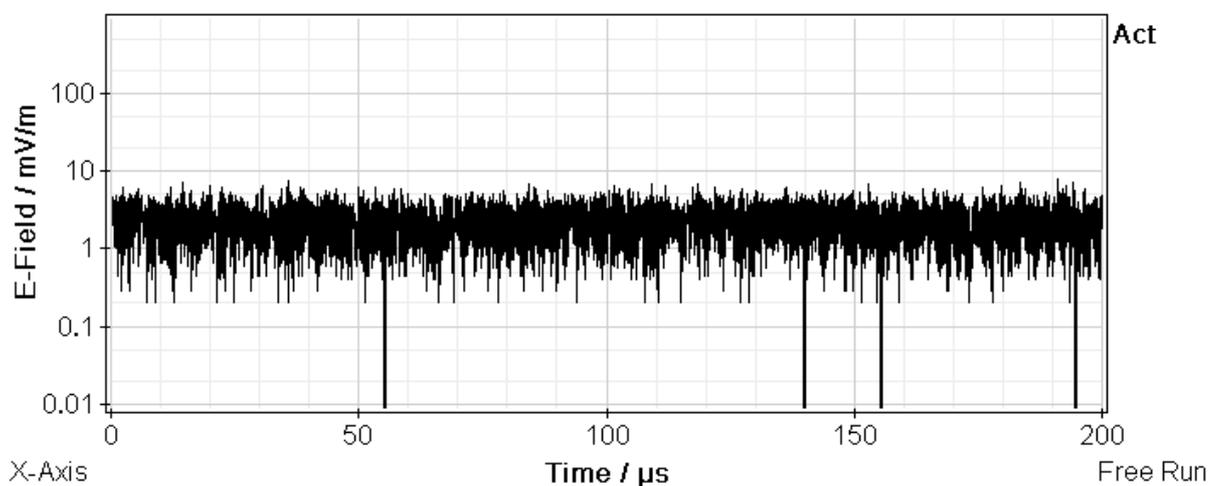


Figure 42 : Mesure de l'enveloppe d'une porteuse rayonnée par une station de base WiMAX en l'absence de trafic (fréquence centrale : 3,58 GHz – filtre : 20 MHz – résolution : 50 ns)

3.2.14. Modulation SSB (Single-sideband) et Process SSB

La modulation *Single-sideband* (SSB), également appelée *Single-sideband suppressed-carrier* (SSB-SC) est une modulation d'amplitude à bande latérale unique. Pour rappel, le spectre de la modulation d'amplitude AM classique contient deux bandes latérales (situées de part et d'autre de la porteuse), chacune comprenant le spectre du signal modulé. La SSB consiste à supprimer une des bandes latérales dans le but de réduire de moitié la largeur de la bande de fréquences nécessaire. Elle permet également une diminution de la puissance rayonnée. On signalera que la télévision analogique utilise cette modulation pour la transmission des images. Le son est quant à lui transmis au moyen d'une modulation de fréquence.

Par ailleurs, le « Process SSB » ne désigne pas un standard de système de télécommunications connu. Selon l'IBGE, il s'agit d'une modulation SSB pour laquelle le signal modulant (qui représente le message à transmettre) subit une préaccentuation en vue d'améliorer la qualité sonore.

Cette technique est notamment utilisée par l'Armée belge et les détails sont confidentiels. En outre, les émetteurs concernés ne sont utilisés qu'en situation d'urgence, ce qui rend impossible la réalisation de mesures.

Selon les informations communiquées par l'IBGE, les émetteurs SSB et Process SSB utilisés par l'Armée belge seraient uniquement utilisés pour la transmission de messages sonores et ils ne généreraient pas d'impulsions ou d'interruptions du signal rayonné. L'enveloppe du signal rayonné

devrait par conséquent ressembler à celle de la figure 2 qui correspond aux rayonnements d'émetteurs de radiodiffusion AM. Sur base de ces hypothèses, les rayonnements des émetteurs SSB et Process SSB utilisés par l'Armée belge ne devraient pas présenter un caractère pulsé.

4. ANALYSE DES DOCUMENTS

Comme mentionné dans l'introduction, un des aspects de l'étude comportait l'examen de quatre documents communiqués par l'IBGE.

4.1. Courrier de Norkring à l'IBGE

Dans son courrier à l'attention de Bruxelles Environnement daté du 21 décembre 2010, Norkring émet l'avis suivant concernant les signaux produits par les émetteurs DAB et DVB-T :

« Gepulseerde systemen zijn systemen waarbij korstondig pulsen met een groot vermogen wordt uitgezonden... Systemen die aan deze definitie voldoen zijn bv. radarsystemen. Hier bestaat het uitgezonden signaal uit een korte puls met zeer groot vermogen gevolgd door een lange periode zonder vermogen. Het gemiddelde vermogen ligt veel lager dan het vermogen gedurende de pulsen en het uitgezonden signaal vertoont een duidelijk gepulst 0-1 patroon. Voor dergelijke systemen leidt het geen twijfel dat het gaat om een gepulseerd systeem. DVB-T noch DAB vertonen evenwel deze karakteristieken en vallen niet onder deze definitie van gepulseerd. »

Ainsi, Norkring explique que sont considérés comme pulsés les systèmes qui émettent des impulsions courtes de forte amplitude. Il cite notamment le radar à impulsions qui en est l'exemple type, puisqu'une brève impulsion est suivie d'une longue période durant laquelle l'émission est interrompue. Norkring se fonde notamment sur la méthode adoptée par l'ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*)²¹ pour traiter les radars à impulsions, laquelle ne prend en compte que les effets thermiques. Norkring compare les signaux émis par de tels radars à ceux produits par les antennes DVB-T et DAB et en conclut que ces émissions ne correspondent pas à cette définition.

La classification par l'ISSEP du signal DAB parmi les ondes pulsées résulte de la définition adoptée au paragraphe 2.6, laquelle considère, en autres, que les impulsions ne sont pas nécessairement brèves par rapport à l'intervalle de temps qui les sépare.

4.2. Rapport d'étude de l'ANPI

Dans la version finale du rapport d'étude de l'ANPI [ANPI 2007], il est fait mention au paragraphe I.2.1.5 du caractère pulsé d'un certain nombre d'émissions radioélectriques : *« Les systèmes modernes de radio-communication mettent en œuvre des techniques de multiplexage et d'accès multiple qui impliquent une modulation en amplitude par "tout ou rien" de la porteuse micro-onde. On peut citer par exemple l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) des systèmes GSM et TETRA, l'accès multiple par répartition dans le code (CDMA) de l'UMTS et le multiplexage temporel (TDD) de l'UMTS et du WiMax. Du fait de la modulation en amplitude par "tout ou rien", on parle de signaux modulés en amplitude par impulsions (PAMW – pulse amplitude modulated wave) ou d'émissions pulsées. »*

Il convient de compléter ces informations afin de lever toute ambiguïté. On mentionnera tout d'abord que l'objectif du rapport de l'ANPI n'était pas l'étude du caractère pulsé des ondes électromagnétiques. Par ailleurs, dans le paragraphe cité ci-dessus, le terme « modulation » désigne

²¹ Les recommandations de l'ICNIRP sont à la base des réglementations en vigueur dans de nombreux pays en matière de protection contre les rayonnements non ionisants.

les variations d'amplitude dues aux techniques d'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) utilisées pour le GSM et le TETRA ainsi que le multiplexage temporel de l'UMTS dans sa variante TDD et du WiMAX. Au paragraphe 2, nous avons tenu à différencier les variations d'amplitude dues à la modulation proprement dite de celles dues à d'autres causes (multiplexage temporel, synchronisation ou arrêt pour préserver la linéarité des amplificateurs). Nous avons d'ailleurs évité de parler de modulation dans de tels cas afin d'éviter les confusions.

En outre, l'accès multiple par répartition dans le temps (TDMA) n'introduit pas toujours une impulsion ou un arrêt à la fin de chaque *time slot* ainsi que nous avons pu le constater avec les systèmes TETRA et GSM-R. Rappelons en effet que les interruptions des émissions par les antennes TETRA sont effectuées afin de garantir la linéarité des amplificateurs, réduisant ainsi le risque d'interférences indésirables.

Par contre, l'accès multiple par répartition dans le code (CDMA) de l'UMTS FDD et de l'UMTS HSDPA, en tant que tel, n'introduit pas d'interruptions de l'émission. Ces standards n'utilisent pas le multiplexage temporel (TDD) mais le multiplexage fréquentiel (FDD) qui n'est pas pulsé. Le paragraphe I.2.1.5 du rapport de l'ANPI, cité notamment par l'IBGE dans son courrier d'appel d'offre, devrait donc être reformulé. Qui plus est, il est clair, d'après la figure 11 dudit rapport, semblable aux figures obtenues par l'ISSEP, que l'UMTS FDD n'est pas sujet à une modulation d'amplitude par « tout ou rien ».

Ces corrections faites, la mention de l'ANPI du caractère pulsé du GSM, du TETRA et de l'UMTS TDD (qui n'est pas opérationnel en Belgique) est cohérente avec celle de l'ISSEP. Elle ne l'est pas quant à l'UMTS FDD qui est opérationnel, mais les données fournies en aval dans le rapport de l'ANPI confirment notre analyse.

4.3. Courrier du GOF

Dans l'extrait ci-dessous issu d'un courrier daté du 11 mars 2011 à l'intention de l'IBGE, le GOF (*GSM Operators' Forum*) affirme que l'UMTS n'est pas pulsé, tandis que les signaux de télévision numérique DVB-T le sont :

« La Cour constitutionnelle a accepté dans son arrêt du 15 janvier 2009 le principe selon lequel les ondes non pulsées ne devaient pas être soumises aux dispositions de l'Ordonnance (au contraire des ondes pulsées). La Cour partait donc du principe que les ondes de la radiodiffusion et de la télévision étaient non pulsées et celles des antennes de téléphonie mobile étaient pulsées. Or, si l'on appliquait ceci à la lettre, la technologie de téléphonie mobile UMTS/3G étant non pulsée, celle-ci devrait être exclue du champ d'application de l'Ordonnance, alors que la nouvelle technologie de télévision par les ondes (à savoir la télévision numérique –DVB-T/DVB-H–) étant pulsée, celle-ci devrait être incluse dans son champ d'application. »

L'analyse faite au paragraphe 3.2 valide l'argument du GOF quant au caractère non pulsé de l'UMTS FDD ; elle contredit par contre l'affirmation du GOF à propos des ondes émises par le DVB-T. Il a d'ailleurs été montré au paragraphe 3.2 de ce rapport, d'après les figures 19, 20 et 30 à 36, que des similitudes de forme existent entre les rayonnements des antennes de téléphonie mobile UMTS et ceux des antennes de télévision numérique DVB-T.

4.4. Note au cabinet du Ministre Huytebroeck

Dans son courrier à l'attention du cabinet de Madame la ministre Huytebroeck, l'IBGE, après avoir signalé que ni l'UIT (*Union Internationale des Télécommunications*), ni l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) ne définissent ce qu'est une onde pulsée, considère que le terme « pulsé » est actuellement utilisé pour désigner deux types de signaux distincts.

Tout d'abord, l'IBGE met l'accent sur l'origine étymologique du mot « pulse » qui signifie « impulsion » en anglais et dont l'exemple type est l'émission électromagnétique brève mais intense, à intervalle de temps régulier, du radar à impulsions. Cette interprétation coïncide avec celle développée par Norkring à l'attention de l'IBGE (voir paragraphe 4.1).

De cette interprétation, l'IBGE distingue ensuite les signaux de type « micro-ondes pulsées » émis notamment par les GSM²² dont la forme crénelée des signaux émis est due à la technique d'accès multiple par répartition dans le temps déjà évoquée au paragraphe 2. L'IBGE met l'accent sur la différence du rapport durée/intensité des créneaux GSM et des impulsions radars.

Il convient de nuancer le paragraphe qui suit : « *Par contraste, le signal analogique n'observe pas de bursts ou créneaux répétés, mais bien une variation beaucoup plus douce et plus aléatoire ...* » Les figures 2, 9, 10 et 13 de ce rapport montrent que les variations d'allure aléatoire peuvent être importantes (plus de 10 dB) sur des intervalles de temps très courts.

Les conclusions de ce document fourni par l'IBGE sont reprises ci-dessous :

*« Les technologies suivantes peuvent être assimilées au terme « pulsé » :
« GSM 900, GSM 1800, UMTS, WIFI, WIMAX, GSM-R, TETRA.
Ce sont, en fait, des technologies qui mettent en œuvre des techniques de multiplexage et d'accès multiple qui impliquent une modulation en amplitude par "tout ou rien" de la porteuse micro-onde.
Le DAB et le DVB-T par contre n'utilisent pas ces techniques et il n'y a pas de modulation d'amplitude par tout ou rien. De plus, les signaux numériques à transmettre sont modulés sur une onde porteuse analogique. Ils sont non pulsés [...] »*

Comme nous l'avons fait dans notre analyse du rapport de l'ANPI (voir le paragraphe 4.2), nous rappelons que la variante TDD de l'UMTS n'est pas utilisée en Belgique. Nous avons par ailleurs mis en évidence le caractère non pulsé des signaux UMTS dans le paragraphe 3.2. Par contre, cette technique est utilisée par les réseaux Wi-Fi et WiMAX dont les antennes émettent un rayonnement pulsé conformément à la définition proposée au paragraphe 2.6.

Ainsi que le montre l'analyse des différentes mesures exposée au paragraphe 3.2, les signaux GSM et DCS 1800 sont effectivement pulsés du fait de la technique d'accès multiple et non pas de la modulation comme expliqué au paragraphe 2. Par contre, le rayonnement de stations de base GSM-R actuellement en service en Belgique n'est pas pulsé.

Dans le cas du réseau TETRA de la société ASTRID, l'accès multiple par répartition dans le temps n'implique pas d'interruption de l'émission de la porteuse. Des interruptions de l'émetteur apparaissent néanmoins afin de préserver la linéarité des amplificateurs.

²² L'IBGE inclut également les antennes-relais de téléphonie mobile dans le cadre des émissions « micro-ondes pulsées », mais la forme crénelée des signaux (émissions de « bursts ») est en fait propre aux téléphones portables.

Le caractère pulsé des champs produits par un émetteur DAB, quant à lui, n'est pas la conséquence de la modulation mais est dû à la synchronisation assurée par des interruptions du signal émis. Ce procédé n'étant pas appliqué aux réseaux DVB-T, le champ produit par de tels émetteurs n'est pas pulsé.

Signalons enfin qu'une erreur s'est glissée lors de l'évocation de la norme suisse, au paragraphe 2 de la note : « *Nous constatons que même la Suisse et le Luxembourg, deux pays qui sont également très strictes au niveau des normes pour les antennes émettrices, font une différence sur les niveaux maximum des rayonnements émis par les émetteurs broadcasts en se référant à la norme ICNIRP (28V/m pour les émetteurs radio dans la bande 87.5- 108MHz et 31 V/m pour les émetteurs TV dans la bande 400-862 MHz) alors qu'ils imposent une norme de 4V/m, respectivement 3 V/m, pour les émetteurs GSM.* »

En réalité, dans le texte de l'Ordonnance suisse (voir [ORNI 2008]), on peut lire qu'en ce qui concerne les émetteurs de radiodiffusion : « *La valeur limite de l'installation pour la valeur efficace de l'intensité de champ électrique est de:*

- « *a. 8,5 V/m pour les émetteurs à ondes longues et à ondes moyennes;*
- « *b. 3,0 V/m pour tous les autres émetteurs.* »

En Suisse, la valeur limite pour les émetteurs de radiodiffusion FM est donc de 3 V/m, c'est-à-dire nettement moins que celle autorisée pour les stations de base de téléphonie mobile et qui est de 4, 5 ou 6 V/m selon la bande de fréquences utilisée.

4.5. Synthèse des diverses interprétations

Bien que la distinction entre les ondes pulsées et les ondes continues ne semble pas avoir fait l'objet de critères « officiels », il apparaît que la définition proposée au paragraphe 2.6 et illustrée par la figure 17 rencontre, à quelques nuances près, les diverses interprétations qui figurent dans les documents analysés.

La différence se marque essentiellement par rapport à l'interprétation du Norkring qui ne considère comme pulsés que les rayonnements comportant des impulsions courtes de forte amplitude. Cette interprétation reviendrait à considérer que les rayonnements émis par les stations de base GSM, DCS 1800 et TETRA ainsi que des antennes DAB (qui produisent des impulsions dont la durée est presque égale à celle du cycle) ne sont pas pulsés, ce qui s'écarterait de l'interprétation développée dans les autres documents examinés.

Par ailleurs, on peut lire au paragraphe I.2.1.5 du rapport [ANPI 2007] à propos du caractère pulsé d'un certain nombre d'émissions radioélectriques : « *Les systèmes modernes de radio-communication mettent en œuvre des techniques de multiplexage et d'accès multiples qui impliquent une modulation en amplitude par "tout ou rien" de la porteuse micro-onde.* ». Selon l'ANPI, c'est la modulation en amplitude par « tout ou rien » qui caractérise un rayonnement pulsé. La figure 42, tirée du rapport de l'ANPI en fournit une illustration. L'IBGE, dans son courrier à l'attention du cabinet de Madame la Ministre Huytebroeck, reprend également cette définition. Il est évident que la définition de paragraphe 2.6 et illustrée par la figure 17 englobe celle de l'ANPI.

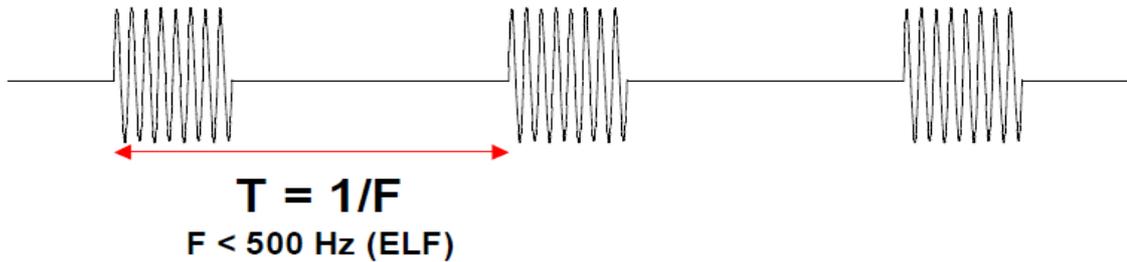


Figure 43 : Figure extraite du rapport [ANPI 2007] illustrant la définition d'une onde modulée par impulsion

Comme précisé au paragraphe 1 (page 3) du document [CSS – avis 8194], le Conseil Supérieur de la Santé a examiné les effets biologiques potentiels des « *champs radiofréquences de faible intensité à caractère pulsé et modulé des techniques de communications sans fil ...* ». A l'évidence, cette étude concerne deux aspects : celui des rayonnements pulsés et celui des rayonnements modulés. Au paragraphe 2 (page 5) de l'avis, on peut lire : « *Si on modifie l'amplitude d'une sinusoïde pure en la rendant par exemple proportionnelle à l'amplitude d'une autre sinusoïde pure, de fréquence différente de celle de la première, on procède à ce que l'on appelle la modulation d'amplitude de la première par la deuxième et l'on obtient une onde modulée.* » On notera que c'est le processus décrit à la figure 1 du présent rapport.

Toujours au paragraphe 2 (page 5) du même avis, on peut également lire que : « *Le plus ancien type de modulation consiste en une commutation « on-off » de l'onde radio. La modulation est dans ce cas une onde rectangulaire²³ correspondant par exemple à des digits « 1 » ou « 0 ». Cette modulation d'amplitude est appelée modulation par impulsion.* » Il s'agit du processus décrit à la figure 3 du présent rapport.

Ces deux passages nous éclairent sur la différence qui existe entre un signal modulé en amplitude, au sens large, et un signal pulsé. Ils corroborent le paragraphe 2 du présent rapport. La description de la modulation par impulsion (caractérisée par une commutation « on-off ») rejoint celle de l'ANPI et de l'IBGE, celle proposée au paragraphe 2.6 du présent rapport ainsi que celle du Norkring, mais dans une moindre mesure.

On rappellera cependant que la définition proposée au paragraphe 2.6 assimile à une extinction de la porteuse (période « off ») une chute de 10 % de l'immission (exprimée en W/m²). De ce fait, elle est un peu plus large que celles du Norkring, de l'ANPI, de l'IBGE et du CSS.

Il est par ailleurs évident qu'un signal pulsé est modulé en amplitude alors que l'inverse n'est vrai que s'il y a extinction de la porteuse pendant un certain temps, ou du moins que le minimum d'amplitude puisse être considéré comme une extinction (par exemple une chute de 10 % de l'immission exprimée en W/m²). La figure 44 correspond à un signal modulé en amplitude, mais qui n'est pas pulsé et dont l'enveloppe ne présente aucun caractère périodique.

La figure 45 quant à elle décrit un signal modulé en amplitude, non pulsé et dont l'enveloppe présente un caractère périodique.

Ajoutons que l'enveloppe d'un signal pulsé dont la somme des périodes « on » et « off » est constante (c'est-à-dire que les impulsions se répètent à une cadence constante) présente un caractère périodique évident. C'est le cas notamment pour les signaux des figures 4 et 9.

²³ On fera remarquer que le terme « enveloppe rectangulaire » eut été plus approprié que celui « d'onde rectangulaire » employé dans l'avis du CSS.

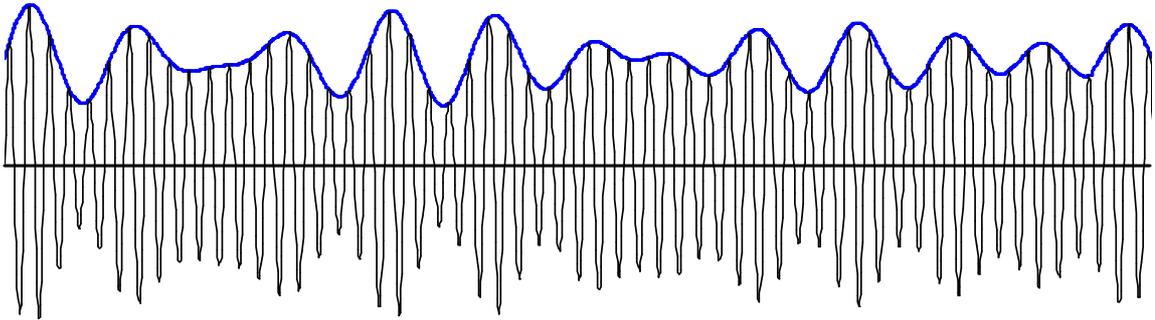


Figure 44 : Signal modulé en amplitude, non pulsé et dont l'enveloppe ne présente aucun caractère périodique

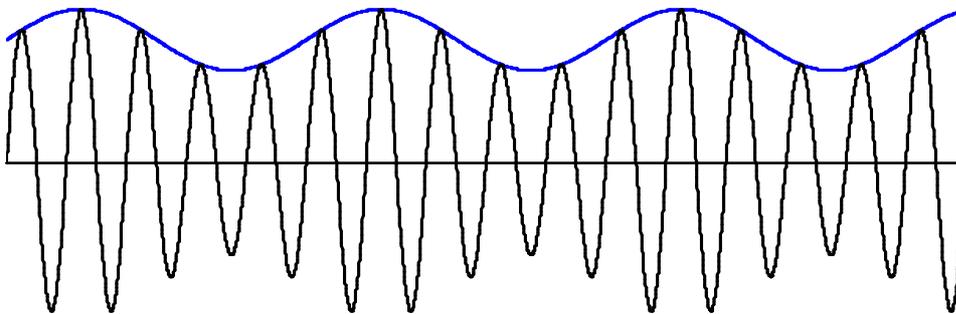


Figure 45 : Signal modulé en amplitude, non pulsé et dont l'enveloppe présente un caractère périodique

Bien que le document [CSS – avis 8194] ait examiné simultanément les rayonnements radiofréquences à caractère pulsé et à caractère modulé, on notera qu'il n'a considéré que les signaux dont l'amplitude est modulée (ou pulsée) en basse fréquence. Ces deux caractères ont en commun certains aspects ce qui explique qu'ils aient été traités dans un même avis. Cela peut toutefois prêter confusions lorsqu'il s'agit de différencier ces deux caractères. Les explications fournies ici clarifient trois notions :

- a) les signaux pulsés : ils sont caractérisés pas des périodes « on » et « off », sachant qu'une chute de l'immission d'une certaine ampleur et pendant une certaine durée est assimilable à une extinction. Dans la définition proposée au paragraphe 2.6, la somme des périodes « on » et « off » n'est pas nécessairement constante, ce qui signifie que l'enveloppe ne présente pas nécessairement un caractère périodique. L'amplitude des signaux pulsés est bien sûr modulée. La figure 17 décrit les différentes formes de signaux qui présentent de telles caractéristiques ;
- b) les signaux modulés en amplitude qui ne sont pas pulsés et dont l'enveloppe ne présente aucune périodicité : la figure 44 illustre un tel cas ;
- c) les signaux modulés en amplitude qui ne sont pas pulsés et dont l'enveloppe présente un caractère périodique : ce cas est illustré à la figure 45. Il est à noter que les rayonnements produits par les stations de base du réseau GSM R belge tombe dans cette catégorie. On signalera également que l'article [VIRNICH 2006] mentionne que le rayonnement des stations de base UMTS présente un certain caractère périodique en l'absence de trafic (c'est-à-dire qu'il n'y a que les canaux de contrôles qui sont présents). Ce caractère périodique, peu prononcé, ne correspond nullement à la définition du caractère pulsé. On notera d'ailleurs

que l'auteur n'affirme pas que le signal UMTS-FDD est pulsé, mais au contraire, qu'il ressemble à du bruit lorsque l'enveloppe est enregistrée sur une durée de 5 ms.

On rappellera que l'Ordonnance ne fait référence qu'au caractère pulsé des rayonnements, c'est-à-dire aux signaux décrits au point a) ci-dessus. Les signaux décrits aux points b) et c) ne rentrent pas dans cette catégorie selon aucune des interprétations (ANPI, IBGE, Conseil supérieur de la Santé, Norkring) figurant dans les documents analysés.

5. CONCLUSIONS

L'évolution temporelle des rayonnements émis par les différents systèmes de radiocommunication examinés subit, généralement, d'importantes variations d'amplitude. C'est le cas pour le rayonnement généré par de nombreux systèmes de radiocommunications basés sur une transmission numérique, mais également par des applications plus anciennes, telle que la radiodiffusion en modulation d'amplitude AM, qui utilisent une transmission analogique. Même la radiodiffusion en modulation de fréquence FM, dont l'amplitude de chaque porteuse est constante, donne lieu à de très fortes variations si l'on est soumis aux rayonnements de plusieurs émetteurs. Il a d'ailleurs été expliqué, au paragraphe 2, que le cumul de rayonnements de différentes fréquences et d'amplitude comparable subissait de fortes chutes se répétant à une cadence variable. Ce phénomène est d'ailleurs impossible à éviter étant donné les nombreux usages des transmissions par rayonnements radiofréquences.

En conclusion, l'exposition présente, presque toujours, de fortes variations d'amplitude. Les rares exceptions ne sont rencontrées que lorsqu'il n'y a qu'une seule porteuse dont l'amplitude est constante.

Etablir une frontière entre un rayonnement dont l'amplitude varie fortement (en évitant l'expression « rayonnement modulé en amplitude » afin d'écartier toute confusion avec ce procédé de modulation) et un rayonnement pulsé comporte une part d'arbitraire du fait que certaines variations d'amplitude observées sur des transmissions analogiques pourraient être assimilables à des impulsions. En outre, aucun mécanisme d'action n'ayant été identifié, rien ne permet d'affirmer que de telles variations d'amplitude constituent un risque sanitaire différent de ceux qui seraient dus à des impulsions de forme rectangulaire.

On sait que l'on est généralement exposé à plusieurs rayonnements de même type (par exemple plusieurs porteuses GSM) que les tissus vivants n'ont pas la capacité de dissocier. Partant de ce constat, il convenait de tenir compte de l'addition des rayonnements pouvant être émis par un même système de communication. L'analyse a dès lors été effectuée en tenant compte qu'un ou plusieurs de ces rayonnements pouvaient être présents au même endroit.

Sur base des considérations ci-avant, une définition d'un rayonnement pulsé a ainsi été proposée et utilisée pour classer les différents types de rayonnements figurant dans la liste dressée par l'IBGE : « Emission radioélectrique, qui en fonctionnement normal (excluant les signaux transitoires pouvant être émis à la mise sous tension ou lors de l'extinction d'un appareillage), subit de manière permanente ou intermittente des interruptions récurrentes (pour certains systèmes, en fonction du niveau du trafic). Est considérée comme une interruption, un intervalle de temps de minimum 10 000 périodes²⁴ des porteuses durant lequel l'immission (exprimée en W/m²) subit une chute de 90 % (ce qui correspond à une diminution du champ, en V/m, d'un facteur 3,16). Le calcul de la chute de l'immission prend en compte l'ensemble des rayonnements pouvant être émis dans la bande de fréquences allouée au système de communication concerné. »

²⁴ La période est égale à l'inverse de la fréquence.

Tableau 1 : Synthèse des résultats de l'étude

Sources de rayonnements	Chutes d'amplitude	Cause(s) des chutes	Pulsé / non pulsé
Antennes de radiodiffusion AM	> 15 dB Durée << 10 000 T	Modulation	Non pulsé
Antennes de radiodiffusion FM (exposition à plusieurs émetteurs)	> 26 dB Durée << 10 000 T	cumul des rayonnements	Non pulsé
Antennes de télévision DVB-T	> 20 dB Durée << 10 000 T	Modulation	Non pulsé
Stations de base GSM-R	Porteuse « BCCH » constante. Interruptions porteuse « trafic » Cumul < 10 dB	TDMA	Non pulsé (réseau déployé en Belgique)
Stations de base UMTS 3G et UMTS 3G + HSDPA	> 20 dB Durée << 10 000 T	Modulation, cumul des rayonnements, contrôle des puissances	Non pulsé
Antennes de télévision télévision analogique	15 à 20 dB Durée >> 10 000 T	Synchronisation	Pulsé
Radar à impulsions	Interruptions Durée >> 10 000 T	Emissions d'impulsions	Pulsé
Stations de base GSM et DCS	Interruptions Durée >> 10 000 T	TDMA	Pulsé
Stations de base TETRA	Interruptions Durée >> 10 000 T	Interruptions de l'émission	Pulsé
Antennes de radiodiffusion DAB	Interruptions Durée >> 10 000 T	Synchronisation	Pulsé
Bornes Wi-Fi	Interruptions	TDD	Pulsé
Stations de base WiMAX	Interruptions	TDD	Pulsé
Stations de base LTE	Interruptions ou 20 dB Durée >> 10 000 T	Canaux inactifs en l'absence de trafic	Pulsé
Antennes SSB et Process SSB	Emissions rares et de courte durée. Similaire à la radiodiffusion AM		Vraisemblablement non pulsés

Il est bien évidemment justifié de ne tenir compte que des interruptions récurrentes (périodiques ou non) et d'ignorer les variations qui apparaissent de façon transitoire.

Signalons que les interruptions ne doivent pas nécessairement être séparées par des intervalles de temps constants.

On notera que la définition proposée est en accord avec les interprétations figurant dans les documents analysés au paragraphe 4 et qui émanent de l'ANPI, de l'IBGE, du Conseil supérieur de la Santé dans lesquels un rayonnement pulsé y est caractérisé par une commutation « on-off ». La définition proposée est toutefois un peu plus large puisqu'une chute de l'immission d'une certaine ampleur et pendant une certaine durée est considérée comme une extinction (période « off »).

Bien que le choix des valeurs « 10 000 périodes » et « 90 % » puisse être considéré comme arbitraire, il découle du fait que de fortes chutes se répétant à une cadence irrégulière se produisent lorsque plusieurs rayonnements de différentes fréquences s'additionnent. D'ailleurs, le point de vue extrême qui consisterait à considérer que le cumul des rayonnements de plusieurs émetteurs de radiodiffusion FM ou d'une antenne UMTS est pulsé reviendrait à admettre que tous les signaux radiofréquences le sont. A contrario, si on ne considérait comme pulsés que les rayonnements caractérisés par de brèves impulsions (par rapport à la durée du cycle), il n'y aurait que les rayonnements des radars à impulsions, des téléphones mobiles GSM et des standards de communication basés sur le duplexage par séparation temporelle ou TDD (*time-division duplex*) qui pourraient être admis dans cette catégorie.

Malgré le caractère arbitraire de certains choix, on note que pour la majorité des standards de télécommunications examinés, la conclusion quant au caractère pulsé ou non pulsé ne dépend pas du seuil relatif à la durée et à l'importance de la chute de la puissance rayonnée.

Les standards de télécommunications figurant dans la demande de l'IBGE ont été étudiés et les rayonnements produits par différents émetteurs ont été mesurés. On précisera, à ce sujet, que les mesures ont été réalisées à proximité de sites opérationnels sans le concours des exploitants, à l'exception des cas mentionnés au paragraphe 3.1.

Les résultats de notre analyse sont repris dans le tableau 1. Ils confirment que le caractère « pulsé » n'est généralement pas lié à la nature numérique de la modulation, mais, au contraire, au type de multiplexage ou à la présence de signaux de synchronisation. En particulier, on soulignera que le signal émis par une antenne de télévision numérique n'est pas pulsé, tandis que celui qui est produit par une antenne de télévision analogique l'est. Le caractère pulsé de la télévision analogique est d'ailleurs confirmé par d'autres sources (voir par exemple [AFSSE 2003]). On notera que le caractère pulsé du LTE n'apparaît qu'en l'absence de trafic, au contraire des stations WiMAX qui ne génèrent des impulsions que lors du transfert de données.

REFERENCES

- [CSS – avis 8194] : Effets biologiques potentiels des micro-ondes modulées. Publication du Conseil Supérieur de la Santé n°8194 – 6 février 2008.
- [AFSSE 2003] : Rapport à l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale : Téléphonie Mobile et Santé - Mars 2003 (www.afsse.fr).
- [ORNI 2008] : Ordonnance sur la protection contre les rayonnements non ionisants (ORNI) du 23 décembre 1999 (Etat le 1^{er} juillet 2008) – Document 814.710.
- [ICNIRP 98] : Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Publication de l'International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
- [ANPI 2007] : « Analyse de l'exposition des personnes aux champs électromagnétiques en Région de Bruxelles-Capitale – Lot 1 : Hautes fréquences » - rapport d'étude n° DS/EMF/003 du 23 octobre 2007.
- [VIRNICH 2006] : Wann ist Hochfrequenzstrahlung gepulst ? Untersuchung von Pulseffekten im Zeit- und im Frequenzbereich – Dr.-Ing. Martin H. Virnich – EMV-Tagung des VDB, 22.-23. März 2006 in Stuttgart