

# Approche expérimentale du rayonnement électromagnétique émis par un téléphone portable

par **Dominique OBERT**

Lycée Victor Hugo - 25000 Besançon  
dominique.obert@wanadoo.fr

## RÉSUMÉ

*Cet article vise à présenter quelques expériences en lien avec le rayonnement d'une onde électromagnétique par un téléphone portable. Celles-ci permettent d'illustrer un cours et peuvent être très facilement mises en œuvre par des élèves dans le cadre de travaux personnels. Ce travail a été présenté lors d'un stage de formation destiné aux professeurs de lycée et collège de l'académie de Besançon, intitulé « Physique par les objets quotidiens ».*

## INTRODUCTION

La première partie traite de manière simple du protocole d'échange d'informations en téléphonie mobile. Cette présentation, limitée au réseau GSM 900 (Global System for Mobile communication), est facilement transférable au réseau DCS 1800 (Digital Cellular System) actuellement très utilisé en milieu urbain<sup>(1)</sup>.

La seconde partie présente des expériences qui, pour être bien comprises, seront mises en perspective avec les principes décrits dans la première.

Enfin, une annexe complète l'ensemble en décrivant deux expériences mettant en jeu un rayonnement d'ondes électromagnétiques.

## 1. QUELQUES PRINCIPES UTILISÉS EN TÉLÉPHONIE MOBILE

### 1.1. Un problème de rayonnement

L'échange d'informations entre le téléphone portable et l'antenne relais<sup>(2)</sup> se fait en utilisant une onde électromagnétique (porteuse) que l'on module<sup>(3)</sup>. La figure 1 présente

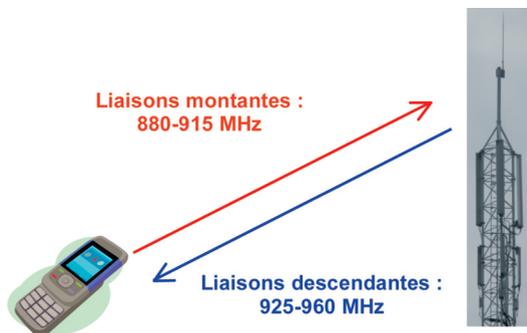
- (1) En général un opérateur utilise les deux bandes : une première autour de 900 MHz et une seconde autour de 1800 MHz.
- (2) Une antenne relais couvre un certain domaine de l'espace appelé « cellule » ; la taille du territoire couvert varie de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres selon la densité de population.
- (3) Il s'agit d'une modulation de fréquence du type « tout ou rien ».

une photographie d'une antenne relais d'une station de base ; la hauteur typique d'un élément étant le mètre.



**Figure 1 :** Antenne relais sur pylône.

La figure 2 présente les intervalles de fréquences des porteuses utilisés pour les liaisons « montantes » (du téléphone portable vers l'antenne relais) et « descendantes » (de l'antenne relais vers le téléphone portable).



**Figure 2 :** Liaisons mobile - station de base en GSM 900.

Chaque porteuse étant modulée, une largeur de 200 kHz est nécessaire donc deux canaux sont « distants » de 200 kHz. Enfin pour une conversation donnée, si à un instant donné le canal de fréquence  $f_1$  est utilisé pour la liaison montante, le canal  $f_1 + 45$  MHz est utilisé pour la liaison descendante.

## – Puissances des ondes électromagnétiques émises

La puissance maximale  $P$  d'émission d'un téléphone portable est de 2 W en GSM 900 et de 1 W en DCS 1800<sup>(4)</sup>. En utilisant l'approximation des champs lointains, on peut, à l'aide d'un bilan énergétique simple<sup>(5)</sup>, donner l'ordre de grandeur de l'amplitude du champ électrique  $E$  en fonction de  $P$  :

$$E = \frac{5,5\sqrt{P}}{d}$$

Diagram illustrating the relationship between electric field amplitude  $E$  (in V/m), power  $P$  (in W), and distance  $d$  (in m) to the antenna. The equation is enclosed in a box, with arrows pointing from the variables to their respective labels:  $E$  to "Champ électrique en V/m",  $P$  to "Puissance en W", and  $d$  to "Distance à l'antenne en m".

On remarque que l'amplitude du champ électrique décroît comme l'inverse de la distance à la source ce qui est une conséquence de la conservation de l'énergie.

La référence [1] présente des mesures expérimentales d'amplitudes de champs électriques rayonnés par des téléphones portables, conduites par un laboratoire de l'INRS (Institut national de recherche et de sécurité). Pour la réglementation relative aux niveaux d'exposition, on pourra consulter la référence [2].

## 1.2. Quelques indications sur le codage du signal

### 1.2.1. Numérisation

Les informations (voix, SMS...) sont transmises sous forme numérique et une porteuse modulée occupe ainsi une largeur spectrale de 200 kHz.

### 1.2.2. Multiplexage temporel

Pour la liaison montante par exemple, un téléphone mobile utilise un canal constitué d'une porteuse modulée en fréquence occupant ainsi une plage de 200 kHz et ceci pendant un huitième du temps. Un intervalle de temps, appelé « time-slot », d'une durée de 577  $\mu$ s est réservé à la communication avec un téléphone portable donné, la porteuse peut être partagée entre huit téléphones mobiles. La figure 3 (cf. page ci-après) illustre

- (4) Pour les stations de base, les puissances utilisées varient en fonction de la taille de la cellule que l'on désire couvrir. Elles vont de quelques watts à une centaine de watts.
- (5) Pour justifier rapidement cette relation, on utilise la moyenne du flux du vecteur de Poynting à travers la surface d'une sphère de rayon  $d$  centrée sur l'antenne :  $\frac{E^2}{\mu_0 c} 4\pi d^2 = P$ . Pour une évaluation plus précise, on peut consulter les ouvrages des références [3] et [4].

le principe de ce « multiplexage temporel »<sup>(6)</sup> : le téléphone portable utilise, dans cet exemple, le time-slot numéro 1 pour la liaison montante, les autres « time-slots » sont donc disponibles pour d'autres communications.

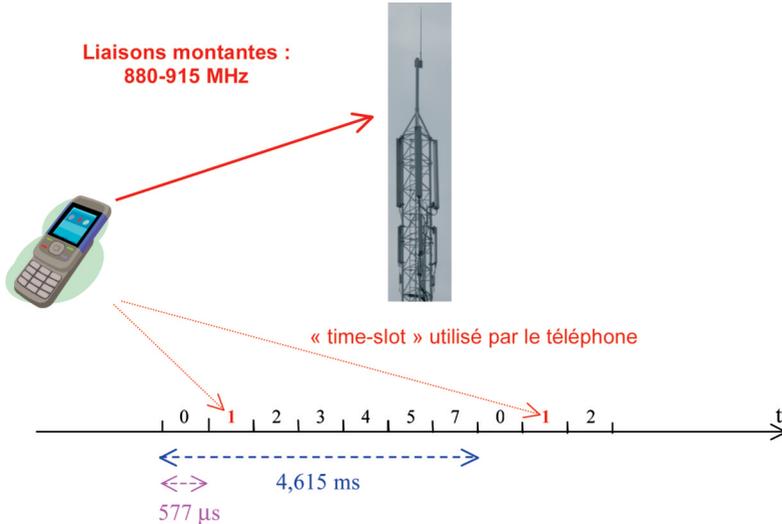


Figure 3 : Multiplexage temporel.

L'existence de ce multiplexage temporel permettra de comprendre de nombreux faits expérimentaux décrits ci-après.

### 1.3. Quelques problèmes spécifiques

#### 1.3.1. Interférences

Les réflexions sur le sol et sur les bâtiments donnent lieu à des phénomènes d'interférences avec la création d'ondes stationnaires. Au voisinage d'un nœud de vibration, l'amplitude du champ électrique est faible et la qualité de la réception mauvaise. La position d'un nœud dépendant de la fréquence de la porteuse, on peut, pour lutter contre l'évanouissement des signaux résultant des interférences destructives, changer périodiquement la fréquence de la porteuse allouée à une communication donnée ; ce procédé est nommé « saut de fréquence ». Il assure une transmission dont la qualité moyenne est améliorée. On peut effectuer ainsi un cycle en utilisant successivement plusieurs fréquences de porteuses<sup>(7)</sup> pour une même communication.

(6) Pour davantage d'informations, on pourra consulter le document de la référence [5].

(7) En zone urbaine très dense, on développe des installations « Dual band » utilisant les bandes du GSM 900 et DCS 1800 et plusieurs dizaines de porteuses.

### 1.3.2. Contrôle automatique de la puissance

Dans le but, d'une part, de limiter le rayonnement et, d'autre part, d'économiser la batterie du téléphone portable, un dispositif ajuste toutes les quatre secondes environ le niveau de la puissance instantanée émise. Ce mécanisme est appelé « contrôle automatique de la puissance »<sup>(8)</sup>.

## 2. QUELQUES EXPÉRIENCES EN LIEN AVEC LA TÉLÉPHONIE MOBILE

### 2.1. Détection d'un appel à l'aide d'enceintes amplifiées

Une observation courante consiste à entendre des grésillements dans un haut-parleur juste avant de recevoir un appel téléphonique. Cela illustre la délicate question de la compatibilité électromagnétique, les phénomènes observés sont liés au multiplexage temporel décrit dans le paragraphe 1.2.



Figure 4 : Détection d'un appel.

*Expérience 1* : On place un téléphone portable au voisinage de deux enceintes amplifiées sous tension et le volume au maximum. On appelle le portable et le bruit diffusé par les enceintes précède le son émis par la sonnerie du téléphone.

### 2.2. Détection à l'aide d'une antenne et d'un voltmètre

On réalise le montage de la figure 5 (cf. page ci-après), il faut pour cela disposer d'une antenne de détection qui comporte deux morceaux de fils de cuivre et une diode HF<sup>(9)</sup>.

- (8) La puissance d'émission peut varier ainsi de quelques dizaines de milliwatts à un ou deux watts.
- (9) L'antenne peut être constituée d'une simple diode HF reliée par deux fils à un voltmètre. La diode HF permet de disposer d'un signal dont la valeur moyenne est non nulle. Si vous ne disposez pas d'une antenne réceptrice dédiée aux ondes centimétriques, une diode au germanium (réf. : AA119 à moins de 2 €) permet une excellente détection.

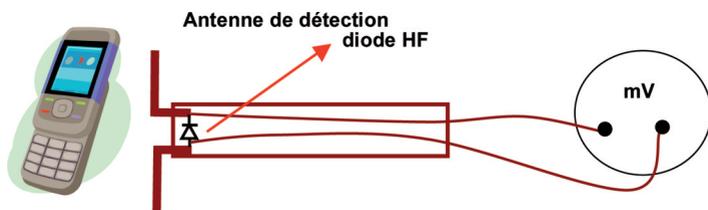


Figure 5 : Détection d'un appel à l'aide d'une antenne.

*Expérience 2* : On appelle le portable à l'aide d'un autre téléphone, le pic de tension observé précède la sonnerie. Par ailleurs, si l'on compose le numéro de sa messagerie, on peut noter une diminution progressive du niveau de réception : c'est le « contrôle automatique de la puissance ».

### 2.3. Détection utilisant une antenne et un système d'acquisition<sup>(10)</sup>

L'objectif est de préciser la forme du signal émis par le téléphone portable.

*Expérience 3* : Pour cela on relie l'antenne du montage de l'expérience 2 à l'entrée analogique d'une carte d'acquisition configurée avec cent mille points de mesure pour une durée totale d'acquisition de 5 s. On peut ainsi avoir accès au détail du signal. On note que la partie « dense » du signal correspond aux « échanges » vocaux et que l'amplitude du signal est de l'ordre de 1,5 V. La figure 6 donne une première représentation du signal obtenu en composant le numéro de sa messagerie.

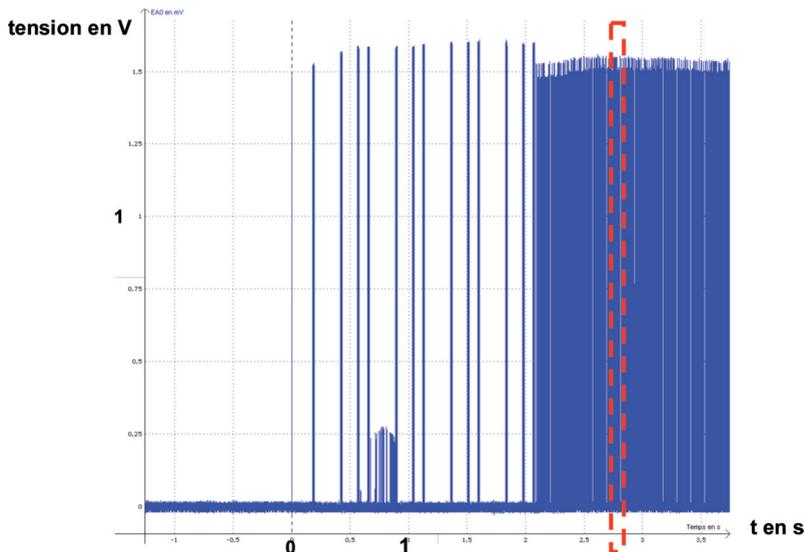


Figure 6 : Tension aux bornes de l'antenne en fonction du temps.

On peut effectuer un premier zoom de la figure 6 pour visualiser la structure du signal dans le domaine des « échanges » vocaux (en pointillés rouges). On obtient le signal ci-dessous de la figure 7. On y voit nettement une période de 4,67 ms, ce qui est voisin de la valeur attendue résultant du multiplexage temporel de période 4,615 ms.

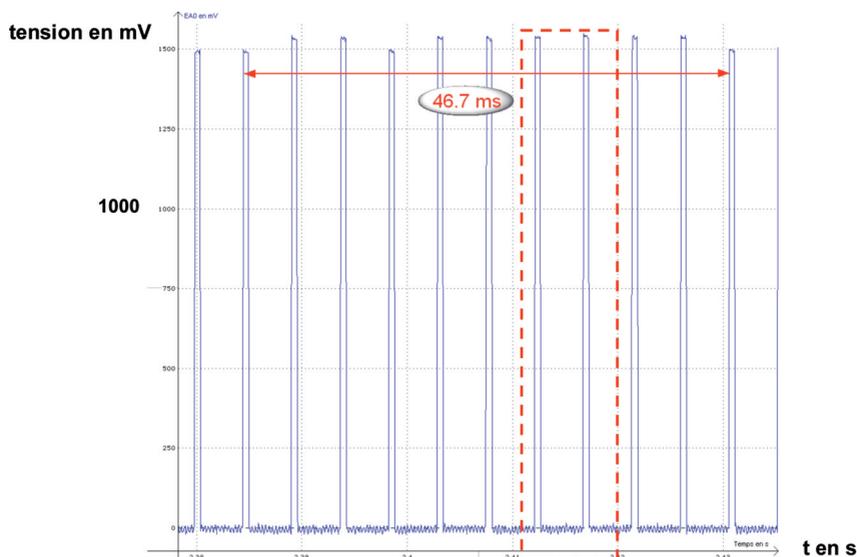


Figure 7 : Tension aux bornes de l'antenne en fonction du temps : premier zoom.

On effectue alors un second zoom qui permet d'évaluer la durée d'un « time-slot » ; durée à comparer avec la valeur attendue de 0,577 ms<sup>(11)</sup> (cf. figure 8 page ci-après).

## 2.4. Anisotropie de l'émission

*Expérience 4* : On recommence l'acquisition d'un signal dans les conditions de l'expérience 3, en plaçant l'antenne de détection côté dos puis côté clavier. La photo de la figure 9 (cf. page ci-après) présente le dispositif utilisé<sup>(12)</sup>.

Les résultats des deux acquisitions sont donnés sur les figures 10a et 10b (cf. page ci-après). Ils montrent clairement une émission réduite côté clavier.

(10) La carte d'acquisition utilisée est SYSAM-SP5 de chez EUROSMART avec le logiciel d'exploitation LATIS-Pro.

(11) Il convient de souligner ici que la structure du signal contenu dans un « time-slot » est inaccessible en raison de la bande passante très insuffisante du dispositif d'acquisition utilisé.

(12) Les manuels d'utilisation des téléphones portables précisent en général la position occupée par l'antenne interne émettrice.

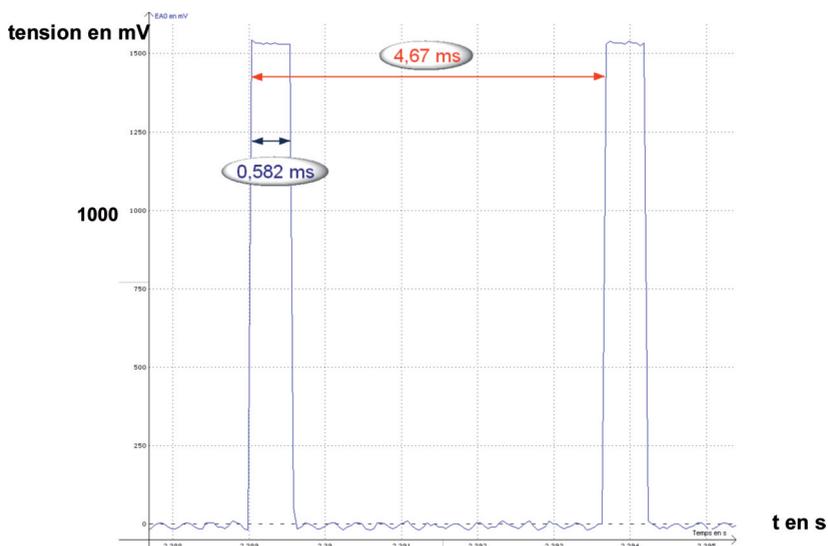


Figure 8 : Tension aux bornes de l'antenne en fonction du temps : deuxième zoom.

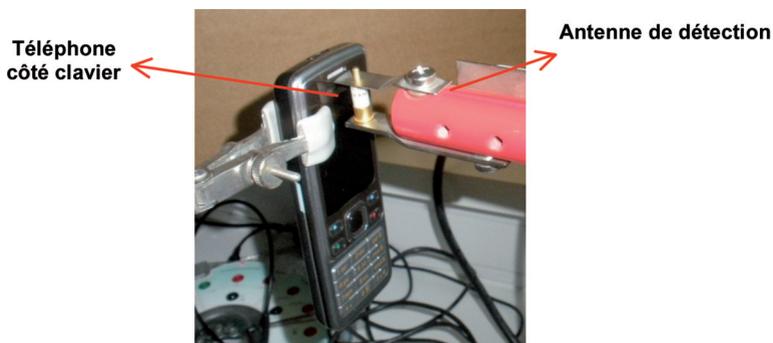


Figure 9 : Antenne placée côté clavier.

## 2.5. Contrôle automatique de la puissance

*Expérience 5* : On recommence l'acquisition d'un signal dans les conditions de l'expérience 3 mais on visualise une séquence plus longue de l'ordre de 30 s. On compose le numéro de sa messagerie et on laisse se dérouler « la conversation » (il n'y a qu'un interlocuteur !). On constate que toutes les quatre secondes environ, le niveau du signal émis est réduit : c'est « le contrôle automatique de la puissance ». Rappelons qu'il s'agit à la fois de limiter le rayonnement et d'économiser la batterie.

tension en V

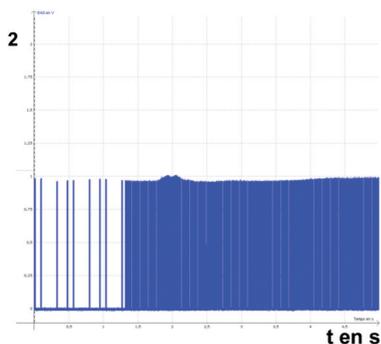


Figure 10a : Antenne côté clavier.

tension en V

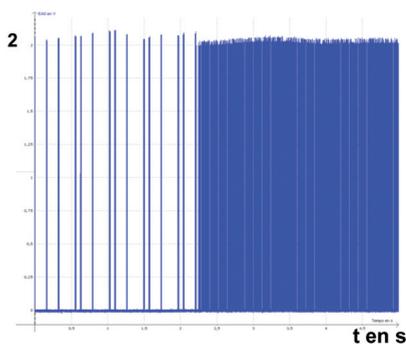


Figure 10b : Antenne côté dos.

La figure 11 illustre la baisse du niveau d'émission d'un téléphone portable qui se fait par paliers.

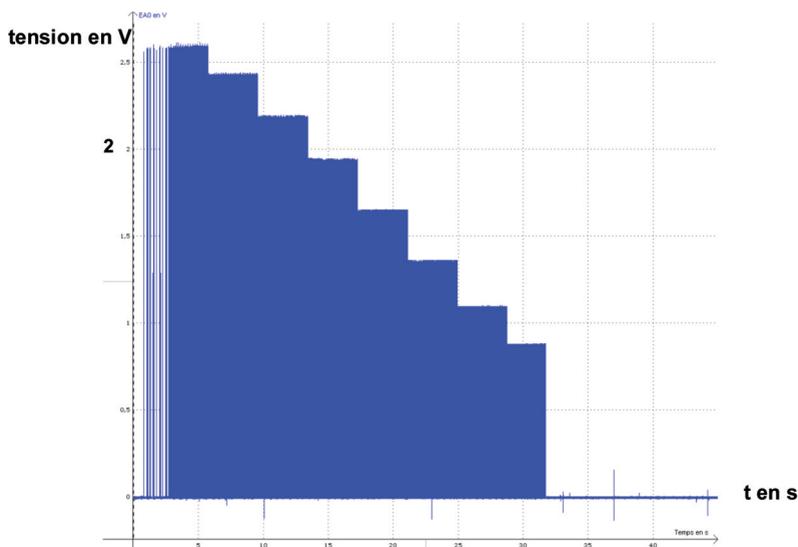


Figure 11 : Contrôle automatique de la puissance.

*Expérience 6* : On reprend l'expérience 5, mais après une première réduction notable du niveau du signal émis, on entoure le système « téléphone antenne » par « une cage de Faraday » fabriquée à l'aide d'une boîte de carton recouverte par du papier d'aluminium.

On note alors une nouvelle augmentation du niveau du signal. La figure 12 (cf. page ci-après) illustre ce phénomène : après la mise en place de la « cage de Faraday », l'amplitude du signal émis réaugmente.

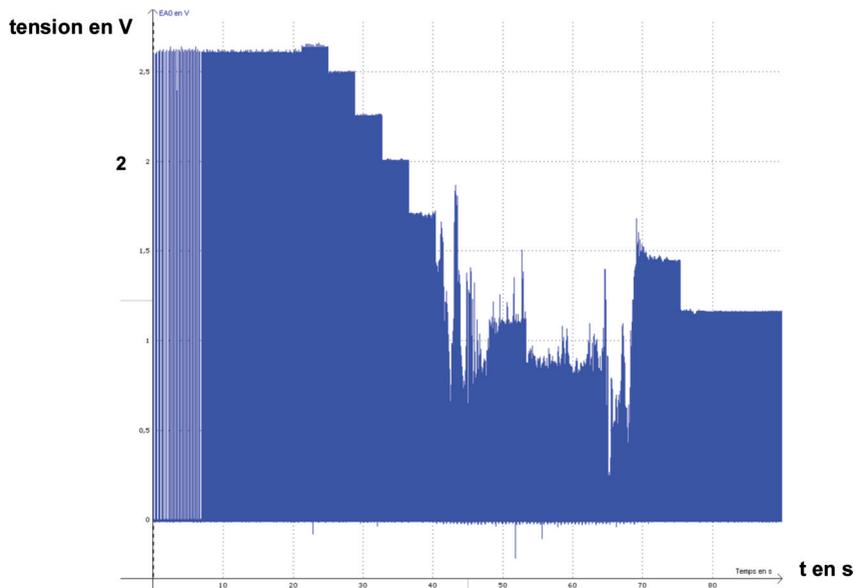


Figure 12 : Contrôle automatique de la puissance : mise en place d’une « cage de Faraday ».

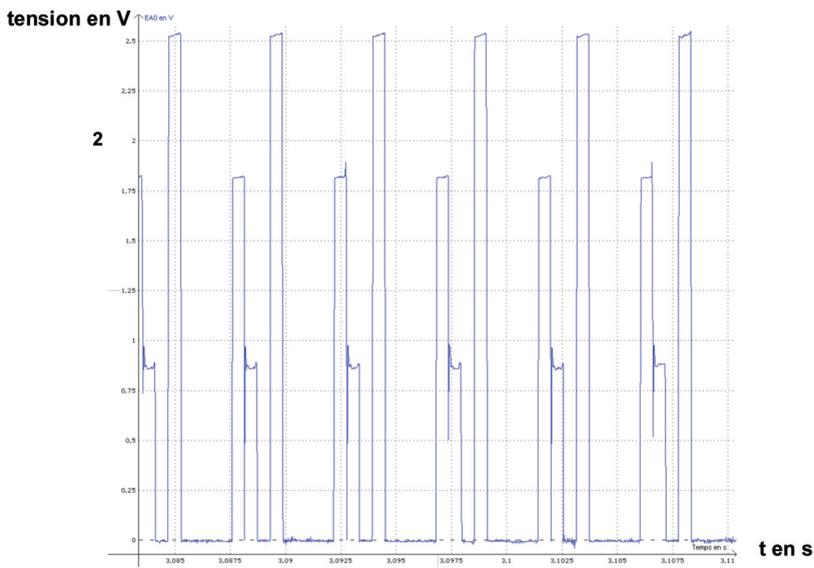


Figure 13 : Signal produit par trois téléphones portables.

## 2.6. Multiplexage temporel

*Expérience 7 : On reprend les conditions expérimentales de l'expérience 2, mais en ajoutant deux autres téléphones portables actifs. On effectue alors plusieurs zooms successifs de manière à bien visualiser la structure du signal résultant.*

La figure 13 (cf. page ci-contre) montre une configuration où deux autres « time-slot » sont utilisés, bien entendu la séquence des changements de fréquence n'est pas visualisable avec ce matériel.

## OUVERTURE

Si l'on dispose d'un analyseur de spectres hautes fréquences, il est possible d'effectuer l'analyse du signal émis par un téléphone mobile. La section de technicien supérieur en électronique de mon lycée dispose d'un analyseur de 3 GHz. L'acquisition d'un signal est délicate et l'analyse spectrale montre essentiellement les différentes porteuses utilisées au cours de l'acquisition dont la durée la plus courte est de 80 ms.

## CONCLUSION

Les ondes électromagnétiques sont de plus en plus présentes dans notre vie quotidienne. L'annexe à cet article présente deux autres expériences très simples, réalisées à l'aide d'une lampe fluocompacte et d'un four à micro-ondes.

Au cours de ce type de travaux, les élèves ne résistent pas, et c'est heureux, à l'envie d'interpeller l'enseignant sur les questions en lien avec l'exposition d'un organisme vivant aux ondes électromagnétiques. Celui-ci n'est pas forcément à même d'apporter des réponses.

Notons simplement que d'une part, il est indéniable que l'exposition de l'homme aux ondes électromagnétiques a augmenté considérablement ces dernières décennies et que d'autre part les usagers et les responsables de la santé publique s'interrogent légitimement sur l'impact de cette exposition sur la santé. Des études sont en cours pour tenter d'établir d'éventuelles corrélations entre téléphonie mobile et cancer ; un article récemment publié dans le magazine *La Recherche* [6] souligne les difficultés méthodologiques de ce type de travaux.

## REMERCIEMENTS

Je remercie Thierry GUILLOT et Serge MONNIN, professeurs au lycée Victor Hugo de Besançon pour leurs précieux conseils et Olivier RODIN, technicien, pour sa disponibilité et pour l'aide qu'il m'a apportée lors de la mise en œuvre expérimentale.

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] KLEIN R. « Rayonnement électromagnétique des téléphones portables ». *Cahier de notes documentaires*, n° 176 (INRS).  
Article disponible sur la base de données de l'INRS à l'adresse :  
[http://www.inrs.fr/htm/bases\\_de\\_donnees.html](http://www.inrs.fr/htm/bases_de_donnees.html)
- [2] « Téléphones mobiles et station de base ».  
Article disponible sur la base de données de l'INRS à l'adresse :  
[http://www.inrs.fr/htm/bases\\_de\\_donnees.html](http://www.inrs.fr/htm/bases_de_donnees.html)
- [3] PÉREZ J.-Ph., CARLES R., FLECKINGER R. et LAGOUTE C. *Électromagnétisme : Fondements et applications*. Paris : Dunod, 2001.
- [4] COMBES P.-F. *Micro-ondes - Volume 2 : Circuits passifs, propagation, antennes*. Paris : Dunod, 2001.
- [5] TISAL J. *Le réseau GSM*. Paris : Dunod, 1997.
- [6] DUVAL C. *La Recherche*. septembre 2009, n° 433.



**Dominique OBERT**  
Professeur en CPGE  
Lycée Victor Hugo  
Besançon (Doubs)

## Annexe

### Rayonnement électromagnétique émis par une lampe fluocompacte

On peut montrer expérimentalement que les lampes fluocompactes produisent également un faible rayonnement électromagnétique.

L'expérience est décrite sur la figure 14, le capteur est une antenne qui est simplement placée au voisinage de la lampe fluocompacte. Une carte d'acquisition<sup>(13)</sup> permet d'enregistrer le signal émis par l'antenne.

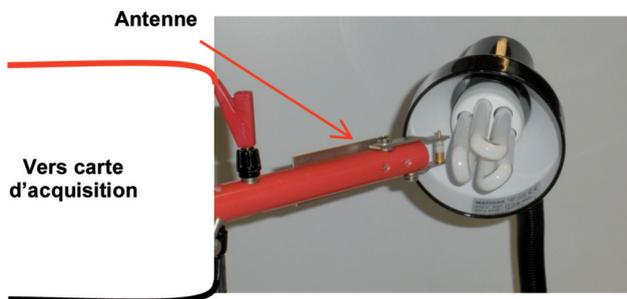


Figure 14 : Montage associant antenne et lampe fluocompacte.

On obtient le signal de la figure 15 (cf. page ci-après) qui montre après un pic de rayonnement, une émission modérée, mais permanente<sup>(14)</sup>. La même expérience conduite avec une ampoule à incandescence ne donne lieu à aucune émission détectable avec ce matériel.

### Rayonnement électromagnétique émis lors du fonctionnement d'un four à micro-ondes

Il s'agit d'une suite d'enregistrements qui visent à suivre un cycle de chauffage de trente secondes environ. Le capteur est une antenne qui est simplement placée devant la porte du four comme le suggère la figure 16 (cf. page ci-après). Le champ rayonné à l'extérieur du four est largement suffisant pour suivre le cycle de chauffe et ceci même avec les fours à micro-ondes récents. L'antenne est reliée à une carte d'acquisition (cf. note 13).

(13) La carte d'acquisition utilisée est SYSAM-SP5 de chez EUROSMART avec le logiciel d'exploitation LATIS-Pro.

(14) Certains fabricants ont récemment mis sur le marché des lampes fluocompactes qu'ils présentent comme n'émettant pas d'ondes électromagnétiques.

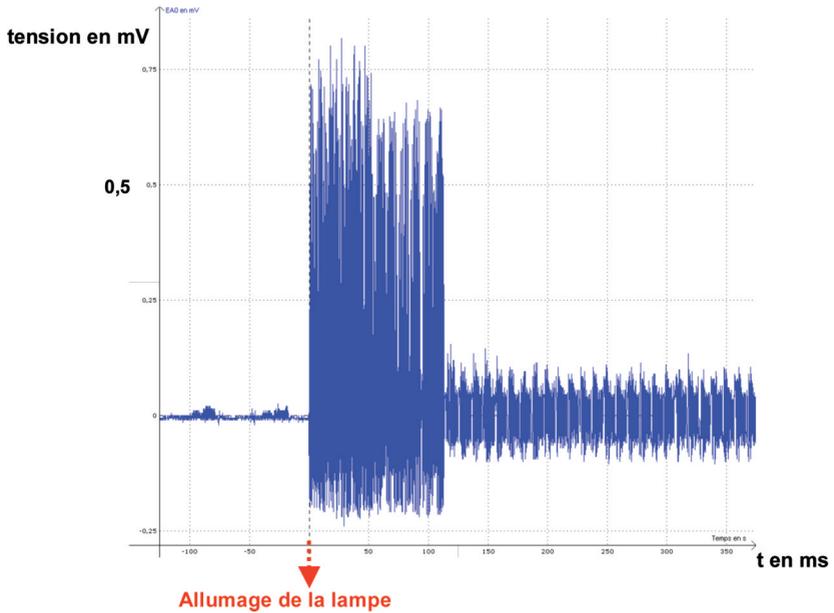


Figure 15 : Signal produit par une lampe fluocompacte.



Figure 16 : Acquisition du signal produit par un four à micro-ondes.

La figure 17 reproduit deux enregistrements pour deux puissances de chauffe différentes.

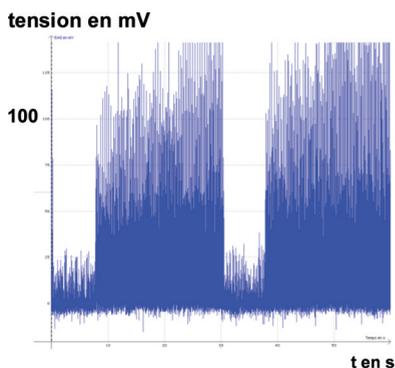


Figure 17a : Puissance « 7 ».

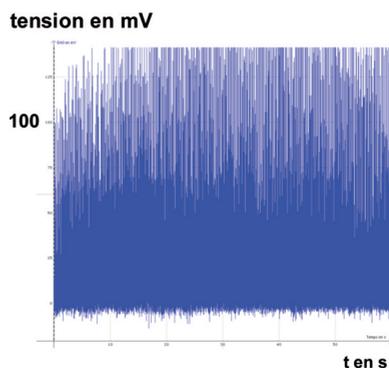


Figure 17b : Puissance « 9 ».

Figure 17 : Allure des signaux acquis.

On constate donc qu'à pleine puissance (« 9 »), le magnétron émet en continu. On note ensuite que pour ajuster la puissance moyenne, on se contente de couper le fonctionnement du magnétron pendant une durée déterminée au cours du cycle, on ne joue donc pas sur l'intensité émise par le magnétron, mais sur la durée de son fonctionnement.