

T.I.P.E: Interférences haut-parleur - téléphone portable

Cooreman Julien

2014-2015

Plan

1	Etude de l'onde émise par le haut-parleur	2
1.1	Montage expérimental	2
1.2	Analyse du signal reçu	3
1.3	Interprétation des résultats	3
2	Etude de l'onde émise par le téléphone	4
2.1	Principe du montage expérimental	4
2.2	Analyse des données	4
2.3	Résultats	7
3	Recherche de la cause de non linéarité	7
3.1	Circuit et composants	7
3.2	Modélisation d'un circuit d'amplification	8
3.3	Résultats	9
4	Conclusion générale	10

Dans une société où le nombre d'appareils émettant des ondes électromagnétiques ne cesse d'augmenter, l'étude des phénomènes de compatibilité électromagnétique est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des différents systèmes électriques qui cohabitent. J'ai donc étudié les couplages électromagnétiques qui existent entre un téléphone portable et un haut-parleur. Je me suis plus précisément intéressé au problème suivant : lorsqu'on écoute de la musique sur un haut-parleur, la réception d'un message ou d'un appel à proximité du haut-parleur provoque l'apparition d'un son parasite qui se superpose au son du morceau de musique écouté. Pour étudier ce phénomène, je me suis tout d'abord intéressé à l'onde émise par le haut-parleur lorsque celui-ci est perturbé par les ondes du téléphone. Ensuite, connaissant la forme de la perturbation en sortie des enceintes audios, j'ai cherché si cette perturbation était visible sur l'onde émise par le téléphone portable. Finalement, ayant trouvé l'origine de la perturbation, j'ai cherché comment une onde de fréquence gigahertz pouvait être démodulée par le circuit d'amplification d'un haut-parleur qui est censé fonctionner en régime linéaire. J'ai ensuite voulu modéliser la réaction d'un transistor face à une onde de haute fréquence pour mettre en évidence comment la puce d'amplification du haut-parleur pourrait faire apparaître un parasite audio.

1 Etude de l'onde émise par le haut-parleur

Ainsi dans un premier temps, j'ai effectué une étude fréquentielle de l'onde acoustique en sortie du haut-parleur.

1.1 Montage expérimental

Pour faire ceci, je me suis muni du matériel suivant :

- un haut-parleur bas de gamme (les haut-parleurs haut de gamme étant bien mieux blindés et possédant des montages annexes de régulation de la perturbation).
- un microphone (ici le simple microphone d'un *Iphone 4* dont toutes les fonctions de communication ont été désactivées au préalable).
- un téléphone portable qui émet un appel (appel de messagerie).

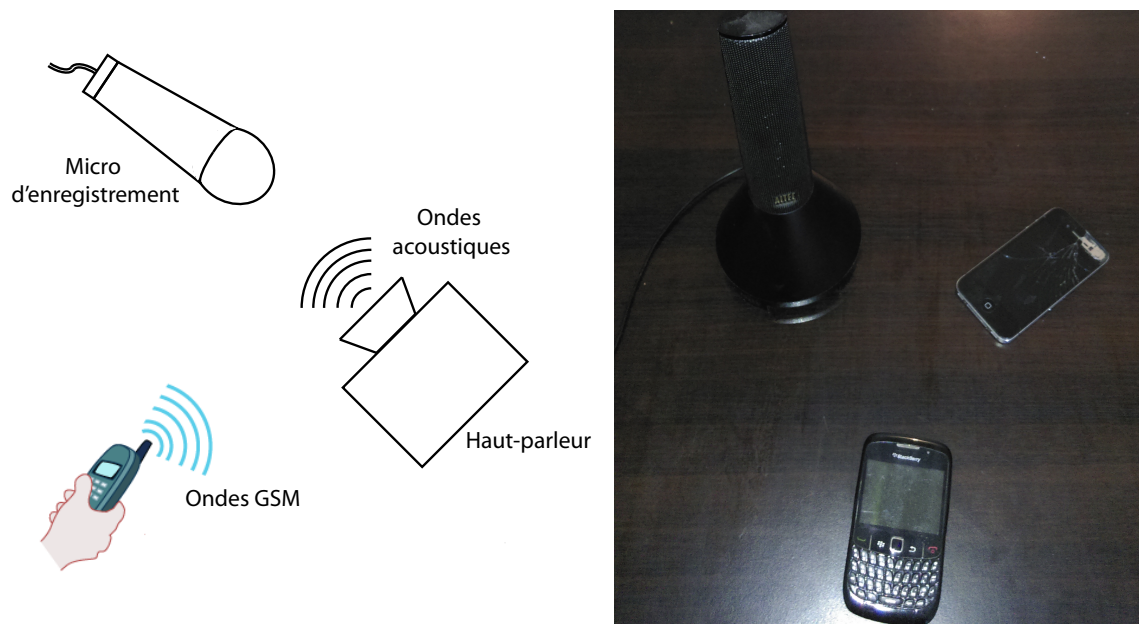


FIGURE 1 – Schéma du montage expérimental

1.2 Analyse du signal reçu

Une fois le son de la perturbation enregistré numériquement, je l'ai importé sur le logiciel *Audacity* qui m'a permis d'extraire un fichier .txt. J'ai ensuite traité ce fichier sous python en faisant une transformée de Fourier rapide du signal obtenu en sortie du haut-parleur. J'ai donc tracé le spectre de fréquence du signal audio.

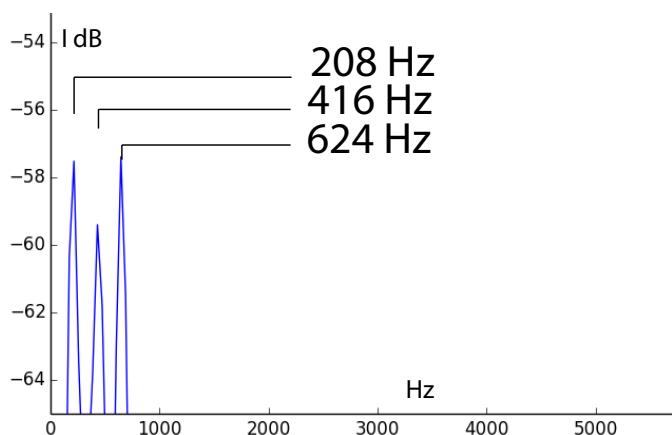


FIGURE 2 – spectre du signal audio

On distingue trois fréquences notables sur le spectre :

- 208 Hz
- 416 Hz
- 624 Hz

On a donc un fondamental de 208 hertz et deux harmoniques.

1.3 Interprétation des résultats

Le son de la perturbation est de fréquence 208 Hz, ce qui correspond bien au son assez grave que l'on perçoit. Or, en étudiant le fonctionnement d'un téléphone GSM, et notamment le multiplexage temporel qui a lieu pour qu'une antenne relai et plusieurs utilisateurs puissent communiquer, je me suis aperçu que l'onde gigahertz du téléphone n'était envoyée que pendant $577 \mu\text{s}$ et ce toutes les $4,67 \text{ ms}$ comme le montre le schéma suivant :

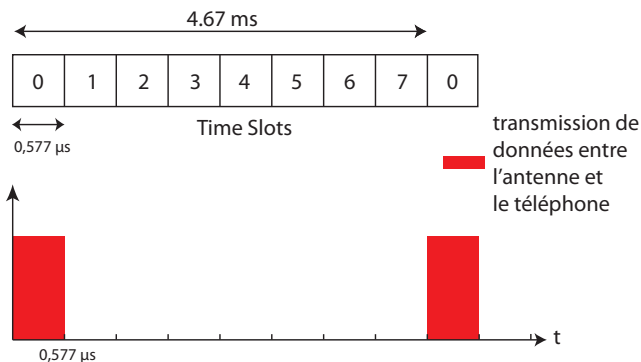


FIGURE 3 – Multiplexage temporel téléphonique

Comme nous pouvons le constater, la perturbation semble résulter d'une démodulation de la porteuse

gigahertz. Seule l'enveloppe de l'onde serait détectée (l'enveloppe serait donc un créneau conformément à la figure 3). Ceci ferait ainsi apparaître des basses fréquences de quelques centaines de hertz en sortie du haut-parleur. En effet, on devrait théoriquement obtenir une fréquence de : $f = \frac{1}{4.67 \text{ ms}} = 214 \text{ Hz}$

2 Etude de l'onde émise par le téléphone

Suite aux résultats précédemment obtenus, je me suis intéressé à l'onde émise par le téléphone portable. Je me suis donc rendu à l'*Institut d'Electronique du Sud (IES)* pour avoir le matériel nécessaire à la détection d'onde gigahertz.

2.1 Principe du montage expérimental

J'ai eu accès à une antenne de détection hautes fréquences (figure 4) qui est composée :

- d'une antenne
- d'une cavité résonnante de longueur caractéristique $\frac{\lambda}{4} = 4,1 \text{ cm}$ pour $f = 1.8 \text{ GHz}$
- d'une diode rapide
- d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure $f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C} = 13 \text{ kHz}$

La diode rapide permet de couper la variation négative du signal gigahertz et ainsi on ne garde que la partie positive du signal. Le filtre passe-bas qui suit cette diode permet de limiter la détection à la détection de l'enveloppe. En effet, une fréquence de coupure de 13kHz correspond à une constante de temps $\tau = \frac{1}{f_0} = 77 \mu\text{s}$. Les mesures ont été faites sur un téléphone *HTC Desire 816* à une distance de 10 cm de l'antenne de détection. Le téléphone émet un appel vers la messagerie et l'ensemble de l'appel est enregistré sur un oscilloscope.

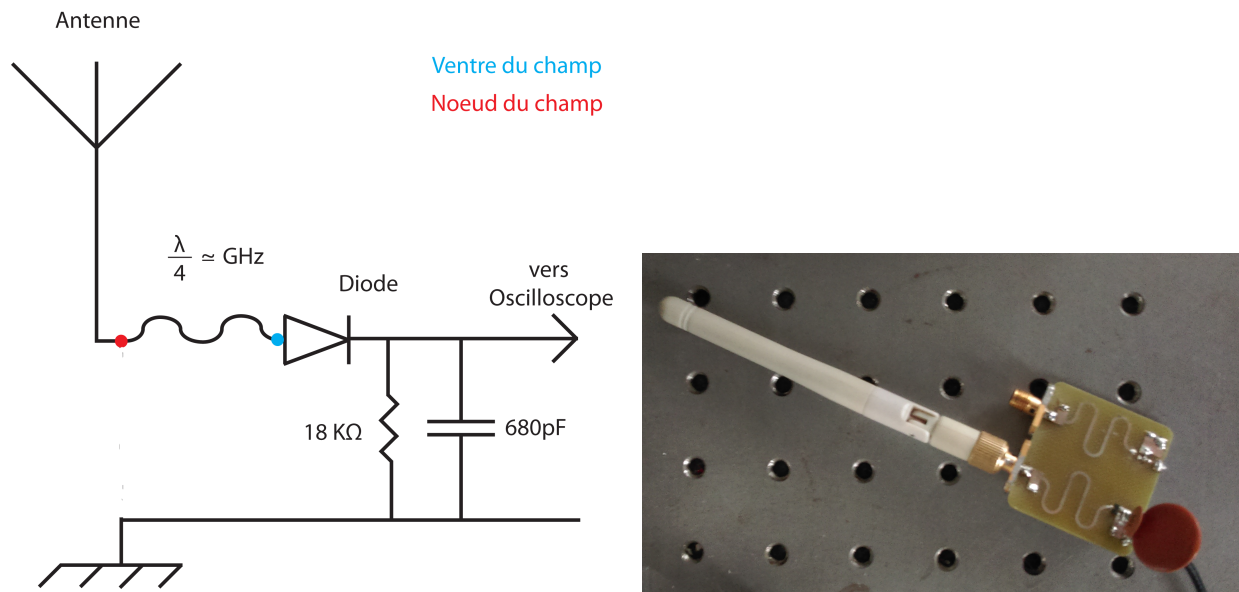


FIGURE 4 – Chaîne de détection

2.2 Analyse des données

Le signal obtenu est présenté figure 5. On distingue très clairement 3 parties distinctes dans le signal. Une première partie encadrée en rouge, qui correspond à l'intervalle de temps entre la demande d'appel

de l'utilisateur (le moment où l'on appuie sur la touche appeler) et la mise en relation avec le téléphone qui reçoit l'appel (le moment où l'on entend que le téléphone sonne). Ensuite la longue période qui suit correspond au dialogue entre les deux interlocuteurs et donc, à la transmission de données. On observe finalement une troisième partie, qui est semblable à la première et qui correspond à la demande de fin d'appel (intervalle de temps entre le moment où l'on raccroche et le moment où l'appel est effectivement terminé).

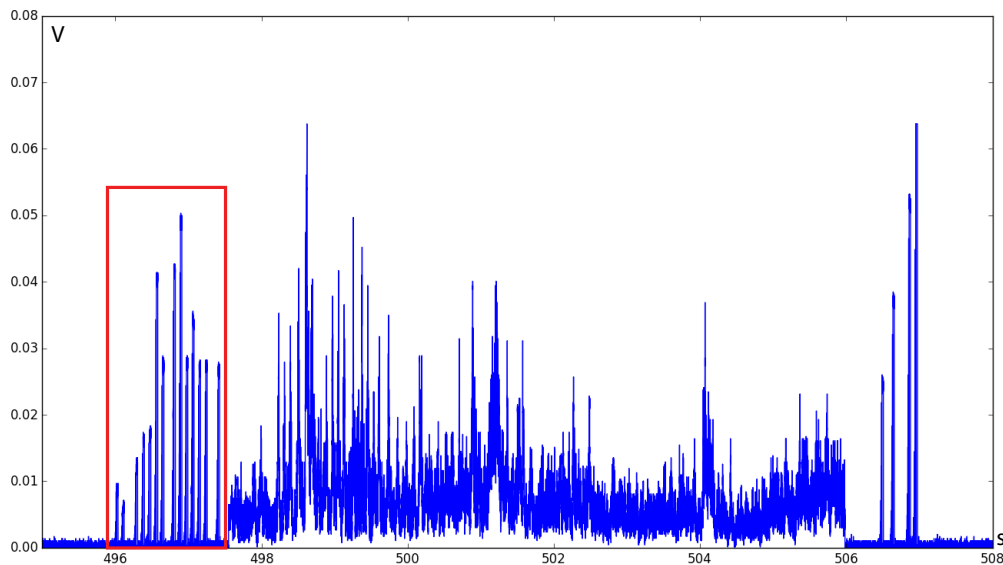


FIGURE 5 – Signal redressé

Si l'on s'intéresse à la première partie du signal qui est celle qui donne lieu à des perturbations, en agrandissant, comme c'est le cas sur la figure 6, on distingue une succession de trames similaires avec une montée en puissance du signal émis. Cette montée en puissance du signal émis correspond à la mise en contact avec l'antenne. Le téléphone augmentant la puissance de l'onde émise, pour arriver à être en contact avec l'antenne relai. Maintenant, en s'intéressant plus précisément à une de ces trames, comme c'est le cas sur la figure 7, on retrouve le multiplexage temporel expliqué précédemment. Le téléphone n'envoie un signal que toutes les 4,6 ms et ce, pendant un temps de 577 μs .

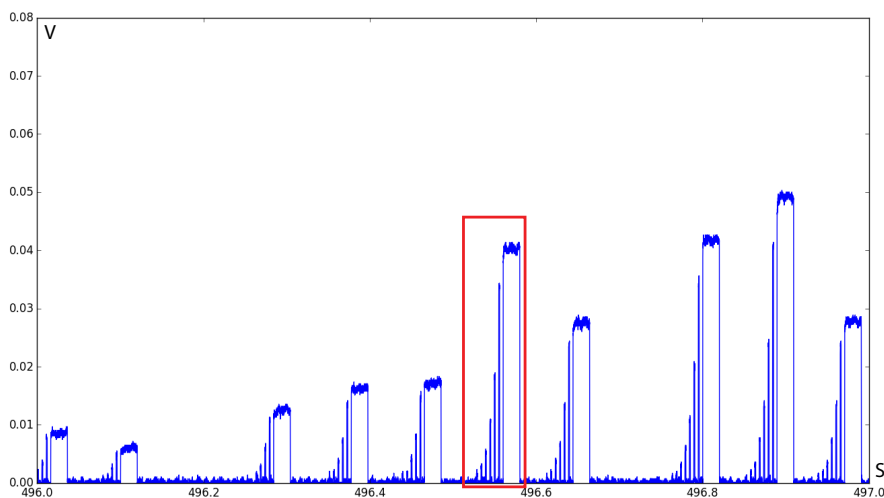


FIGURE 6 – Agrandissement du signal redressé

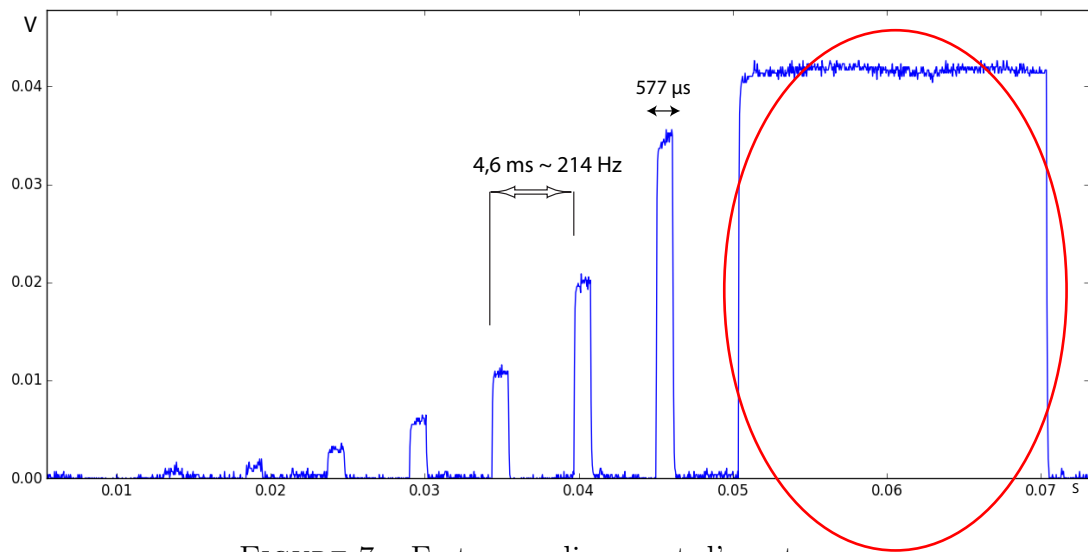


FIGURE 7 – Fort agrandissement d’une trame

Si on trace le spectre de Fourier sur une de ces trames (fig. 8), on retrouve la fréquence du fondamental à environ 200 Hz ainsi que 2 fréquences harmoniques à environ 400 Hz et 600 Hz. On observe également de nombreuses basses fréquences en dessous de 200 Hz qui correspondent à des fréquences qui apparaissent lors de la répétition du motif pour effectuer la transformée de Fourier. Ces basses fréquences ne sont pas réellement audibles car comme on le voit sur la figure 6, une trame n’est pas répétée périodiquement. Ces basses fréquences résultent donc d’un artifice de calcul pour effectuer la transformée de Fourier.

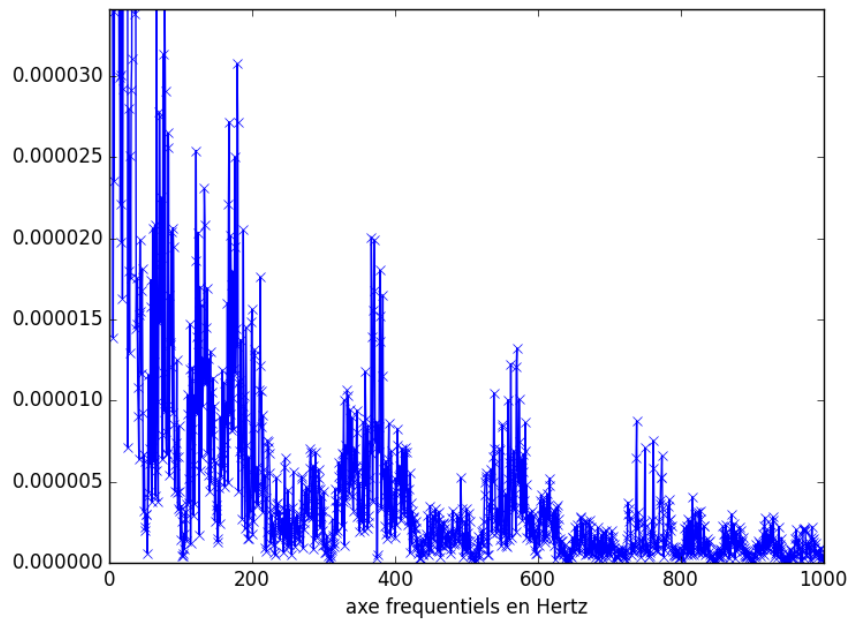


FIGURE 8 – Spectre de Fourier du signal

2.3 Résultats

L'étude du signal émis par le téléphone m'a permis de trouver l'origine de la perturbation. En effet, les fréquences (environ 200 Hz et des harmoniques) qui modulent la porteuse gigahertz de l'onde GSM concordent avec les fréquences de l'onde acoustique en sortie du haut-parleur. On peut donc modéliser le circuit d'amplification du haut-parleur comme une antenne qui démodule l'onde GSM et qui amplifie les fréquences modulant la porteuse. Le problème est donc de trouver, dans le montage du haut-parleur, les éléments qui peuvent avoir un effet non linéaire et donc démoduler la porteuse.

3 Recherche de la cause de non linéarité

Suite aux études précédentes, j'ai cherché les composants électriques susceptibles d'introduire des non linéarités. Il est clair que le montage ne comporte pas de diode capable de travailler à hautes fréquences car les fréquences amplifiées par le haut-parleur sont dans la bande 20 Hz - 20 kHz.

3.1 Circuit et composants

Le circuit imprimé du haut-parleur (Fig. 9) comprend différentes parties :

- Un montage de redressement du signal 50 Hz pour polariser l'amplificateur. Ce montage est composé d'un transformateur (non présent sur la Fig.9) suivi d'un pont de Graetz et d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure très faible (bien en dessous de 50 Hz) pour stabiliser le signal continu. La simple présence de ce filtre implique que la perturbation ne peut pas provenir de cette partie du circuit.
- Le câble d'entrée du signal audio, qui peut probablement faire office d'antenne et ainsi capter l'onde GSM et la propager dans le circuit. Toutefois, elle n'est pas la seule entrée possible pour l'onde GSM. En effet, les ondes hautes fréquences ont une longueur caractéristique très faible, ce qui leur permet d'être captées par de nombreux composants.
- Le circuit d'amplification, qui est la source la plus susceptible de démoduler la porteuse.
- Le montage de régulation du volume qui ne possède pas de composant susceptible de démoduler la porteuse gigahertz.
- Une sortie auxiliaire déconnectée ici.
- Le bouton d'alimentation, qui n'est qu'un interrupteur.
- Le haut-parleur, (non représenté sur la Figure 9) qui capte probablement les ondes GSM. Cependant, celui-ci se trouve après le montage d'amplification et ne peut donc pas rendre cette perturbation audible.

Ainsi, seule la puce du montage d'amplification est susceptible de démoduler et d'amplifier l'onde GSM.

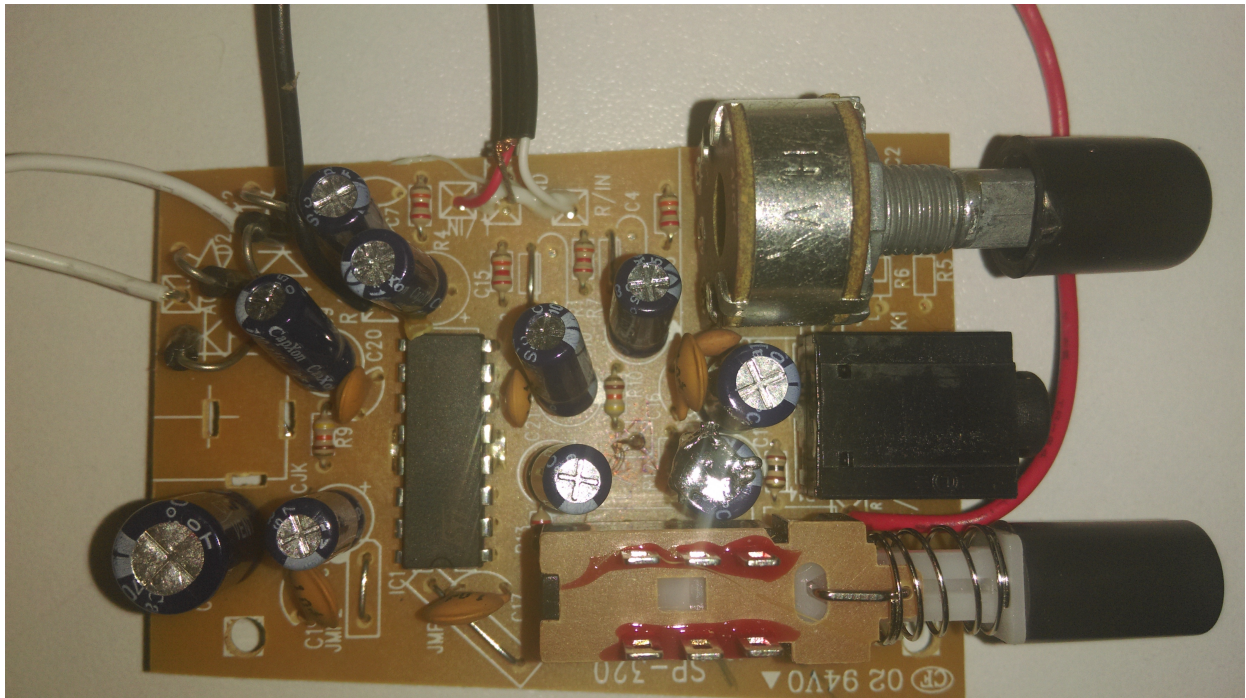


FIGURE 9 – Chaîne d'amplification du haut-parleur

3.2 Modélisation d'un circuit d'amplification

Le manque d'information concernant la puce m'a poussé à contacter différents électroniciens pour avancer dans la mise en évidence de la non linéarité de la puce à haute fréquence. J'ai donc eu la chance de pouvoir travailler avec M. Jullier Michel, électronicien de formation, de la société *DMS*. Nous avons travaillé ensemble sur la modélisation d'un circuit simple comportant des composants présents dans la puce qui seraient capable de démoduler la porteuse. Nous avons donc fabriqué un circuit (Fig.10), comportant uniquement des transistors bipolaires NPN, des condensateurs et des résistances, capable d'effectuer la démodulation.

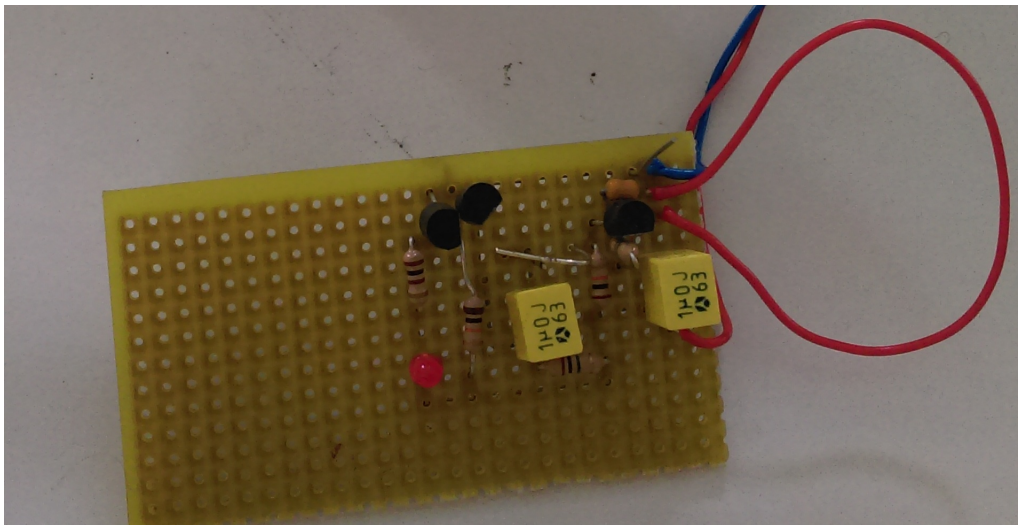


FIGURE 10 – Photographie du circuit modèle

Le circuit comporte quatre parties différentes (Fig.11) :

- Un condensateur de $1\ \mu\text{F}$ qui stabilise la tension de 9 Volt.

- Un boucle de fil qui fait office d'entrée pour la perturbation par induction électromagnétique.
- Un montage d'amplification à base commune, qui sature en présence de la non linéarité, ce qui a pour effet de démoduler l'onde GSM.
- Un montage amplificateur, précédé d'un condensateur filtrant les basses fréquences, qui est composé de deux circuits d'amplifications à émetteur commun en cascades, qui amplifient la tension en sortie du circuit d'amplification à base commune et donc permet d'allumer la diode lorsqu'il y a une perturbation.

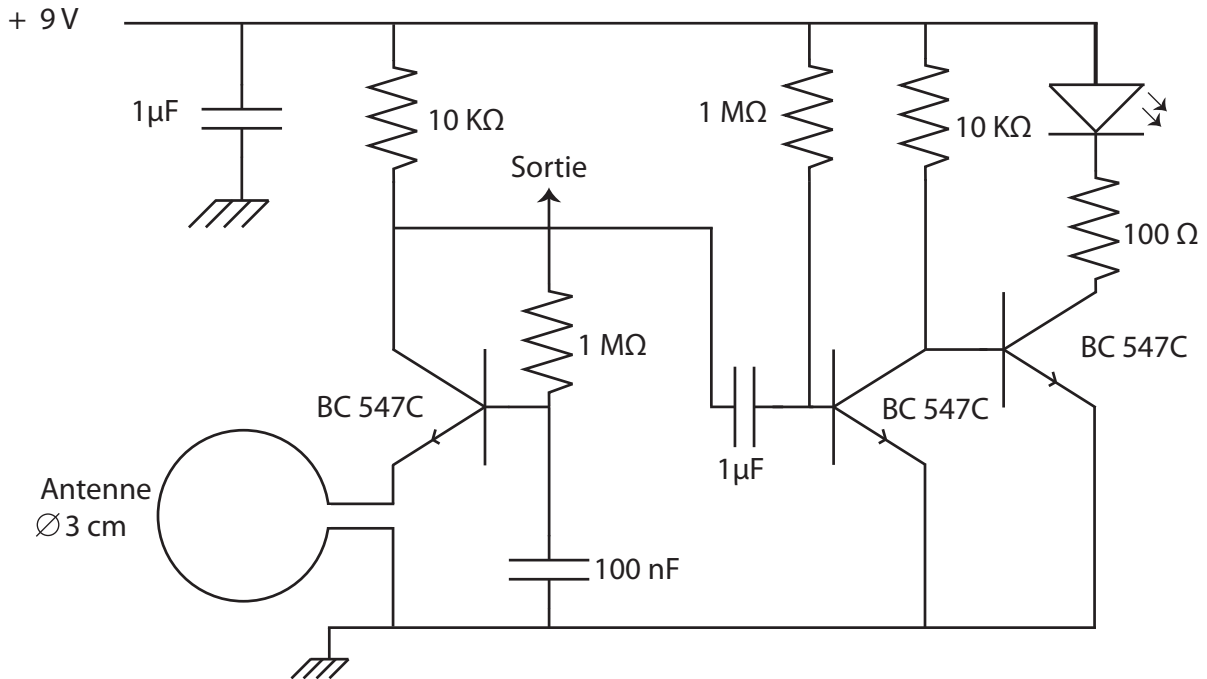


FIGURE 11 – Circuit modèle de l'effet non linéaire du transistor

3.3 Résultats

J'ai donc soumis ce montage aux ondes d'un téléphone portable pour analyser son fonctionnement. Lors d'un appel, la diode s'allume plusieurs fois pendant la phase de lancement de l'appel comme expliqué au 2.1 . Ce montage semble donc bien produire l'effet recherché. Pour s'en assurer, j'ai relié un oscilloscope à la sortie du montage (Fig.11). J'ai soumis le montage à la perturbation comme précédemment. Les résultats de la mesure sont présentés sur la Figure 12. On observe une variation brutale de tension toutes les 4,6 ms soit à une fréquence d'environ 214 Hz, ce qui correspond à la fréquence qui module la porteuse dans l'onde GSM en entrée et à la fréquence de l'onde acoustique en sortie. Ainsi, ce montage modèle montre comment un montage d'amplification réel présent dans la puce d'amplification du haut-parleur pourrait démoduler la porteuse et l'amplifier. Le montage réel n'est sûrement pas exactement le même. Cependant, il fonctionne avec des composants similaires dans un schéma similaire. Les transistors présents dans les montages d'amplifications, qui sont des montages généralement censés fonctionner linéairement, peuvent, à hautes fréquences, avoir un effet non linéaire. Ici cet effet de saturation démodule la porteuse.

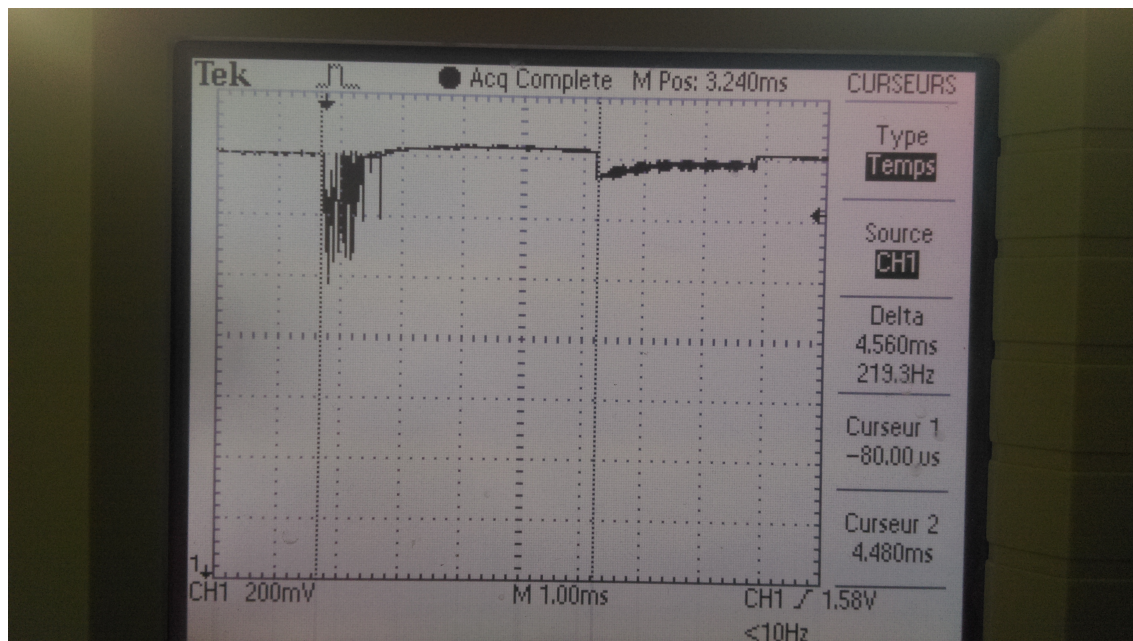


FIGURE 12 – Résultats sur l'oscilloscope

4 Conclusion générale

L'étude du son produit par le haut-parleur en présence du parasite et l'analyse théorique du fonctionnement d'un téléphone portable en communication m'ont permis de comprendre l'origine de la perturbation. Ensuite l'étude de l'onde émise par le téléphone m'a permis de valider l'hypothèse de démodulation du montage d'amplification. Finalement, la modélisation du circuit d'amplification par un montage simple montre comment des composants supposés fonctionner linéairement peuvent avoir un effet de saturation à très hautes fréquences. Des systèmes de filtrage de ces parasites ou encore un meilleur blindage du circuit permet de limiter l'effet de ces parasites, malheureusement ces systèmes sont rarement présents dans les haut-parleurs bon marché.

Références

- [1] Dominique OBERT. *Approche expérimentale du rayonnement électromagnétique émis par un téléphone portable*. UNION DES PROFESSEURS DE PHYSIQUE ET DE CHIMIE- Vol. 104 - Mars 2010.
Article disponible à l'adresse :
[http : //www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article – bup.php?ID_{fiche} = 20636](http://www.udppc.asso.fr/bupdoc/consultation/article-bup.php?ID_fiche=20636)
- [2] AUTEUR INCONNU. *La programmation scientifique avec Python*. OPENCLASSROOM. Mis à jour le vendredi 6 décembre 2013.[consulté le 3 décembre 2014].
Article disponible à l'adresse :
[http : //openclassrooms.com/courses/la – programmation – scientifique – avec – python/scipy – une – trousse – a – outils – qu – elle – est – bien](http://openclassrooms.com/courses/la-programmation-scientifique-avec-python/scipy-une-trousse-a-outils-qu-elle-est-bien)
- [3] Marc VAN DROOGENBROECK. *Multiplexage temporel*. Université de Liège. 11 Juin 2004.
Article disponible à l'adresse :
[http : //www2.ulg.ac.be/telecom/teaching/notes/total0/elen036/node170_mn.html](http://www2.ulg.ac.be/telecom/teaching/notes/total0/elen036/node170_mn.html)
- [4] Fabrice CAIGNET. *Compatibilité électromagnétique*. LAAS - CNRS.
Article disponible à l'adresse suivante :
[http : //homepages.laas.fr/fcaignet/Cours/CEM₂₀₀₄.pdf](http://homepages.laas.fr/fcaignet/Cours/CEM2004.pdf)