



MARR James
MONTALBETTI Tristan

Encadrés par M. Benseeti

Comment la Rectenna peut-elle être une solution durable pour l'alimentation sans fil ?



**OLYMPIADES
DE PHYSIQUE**



Economiser de l'énergie est devenu à la fois un enjeu de société et un objectif partagé par de nombreux acteurs. La plupart des objets connectés tels que les capteurs à distance et leurs périphériques intégrés, n'ont besoin que de faibles quantités d'énergie pour fonctionner. Néanmoins, ils sont tous alimentés par des batteries dont la durée de vie est limitée.

La prolifération croissante de la communication sans fil pose en conséquence la question de l'autonomie énergétique de ces appareils. Les scientifiques, entrepreneurs et industriels parient sur des sources d'énergies ambiantes telles que les ondes électromagnétiques omniprésentes pour rendre ces objets autonomes.

Notre intérêt pour ce sujet est né lors de nos TPE 2018-2019 en lisant un article du « Journal du net ». L'article en question expliquait l'avancement des recherches d'un étudiant allemand axées sur la conversion des ondes électromagnétiques en électricité. Dès lors une problématique a émergé :

Comment la Rectenna peut-elle être une solution durable pour l'alimentation sans fil ?

Mené en collaboration avec M. Didier Stuerger et Jérôme Rossignol professeurs chercheurs au laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne. UMR 6303 CNRS, le présent travail est le prolongement de notre TPE.

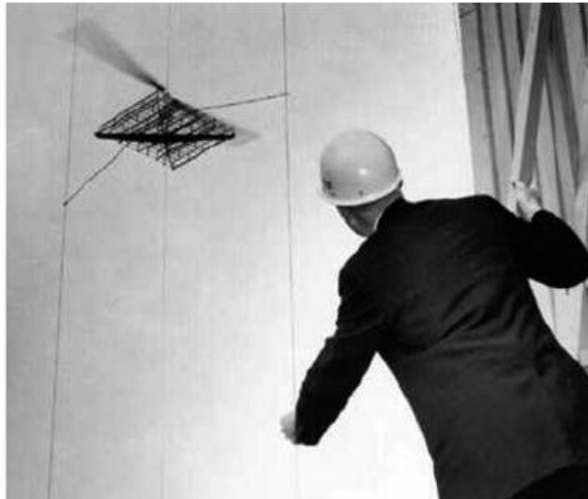
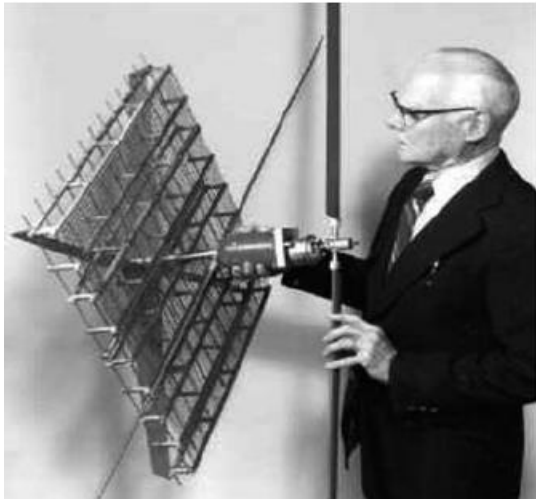
Pour apporter des éléments de réponses à notre problématique nous avons essayé de répondre à plusieurs questions sous-jacentes.

- Comment est née l'idée du Rectenna?
- Quel domaine d'onde électromagnétique devons-nous capter pour une bonne efficacité ?
- Quel type d'antenne sera adapté pour capter ces ondes ?
- Quel montage de redressement choisir et quels composants seront les mieux adaptés ?
- L'énergie récupérée est-elle suffisante pour alimenter un objet électrique de faible puissance ?
- Quelles sont les limites du dispositif réalisé ?
- Quelles perspectives allons-nous donner à la poursuite de ce projet ?

La première Rectenna brevetée

L'antenne redresseuse, plus souvent appelée Rectenna, est un dispositif électrique constitué d'une antenne reliée à un circuit électrique redresseur. Leur rôle respectif est de capter diverses OEM et de récupérer l'énergie de ces ondes pour la transformer (avec le moins de pertes d'énergie possible) en courant électrique. Ainsi, celui-ci pourra alimenter un dispositif sans nécessiter une alimentation.

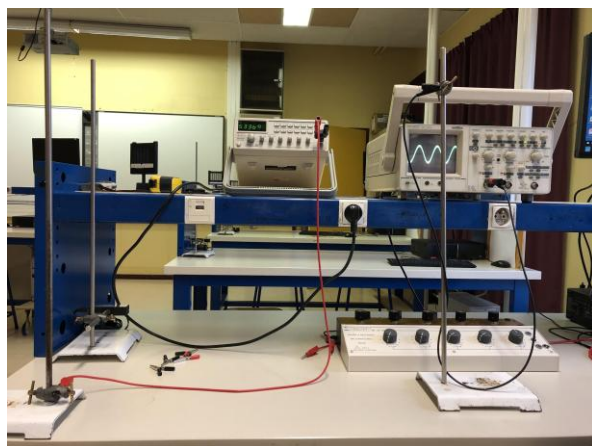
L'ingénieur américain William C Brown, pionnier dans l'utilisation des micro-ondes, inventa ce dispositif en 1964 et le fit breveter cinq années plus tard. Après, avoir représenté les diagrammes de sa création et modélisé le type d'antenne le plus efficace, Brown put créer la première antenne redresseuse avec laquelle il chargea une plateforme contenant les hélices d'un drone hélicoptère. Une fois rayonnée par des OEM, cette plateforme devait théoriquement rester dans les airs indéfiniment.



Notre démarche pour comprendre la transmission et la réception d'une O.E.M.

Avant de nous lancer dans la réalisation du rectenna ou d'une antenne complexe il fallait d'abord créer et émettre un signal afin de visualiser le fonctionnement de l'onde et d'une antenne réceptrice.

Pour cela nous avons pris un GBF, un oscilloscope et seulement deux fils électriques. Cette expérience nous a offert une compréhension du comportement de l'onde électromagnétique ainsi que de l'antenne.



Mise en place de l'expérience :

Nous branchons un des fils électriques au GBF, et l'autre fils à l'entrée de l'oscilloscope. Nous installons les deux fils électriques à la même hauteur.

Sur le GBF nous sélectionnons le mode sinusoïdal et choisissons aléatoirement une fréquence : ici de **50000 Hz** environ. Nous allumons ensuite l'oscilloscope et observons le signal reçu.

Le signal indiqué sur l'oscilloscope a une fréquence identique à celle créée par le GBF.

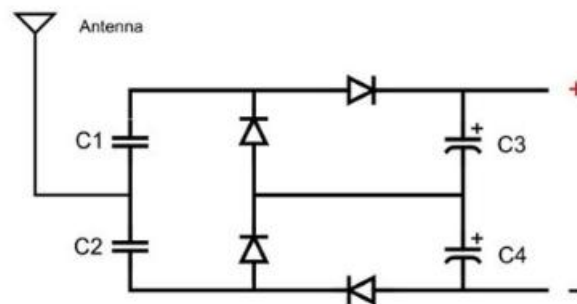
Nous avons donc créé un système où les deux fils électriques deviennent l'un une antenne d'émission et l'autre une antenne de réception.

Conclusion :

Nous avons beaucoup appris de cette expérience. Premièrement, nous avons compris le fonctionnement de la transmission d'une onde électromagnétique : la transmission aérienne des OEM sinusoïdales générées par le GBF s'effectue sans support de matière. Celles-ci s'atténuent avec la distance. Soumise à une tension alternative sinusoïdale, les électrons libres du fil métallique (électron libre des atomes de cuivre) rentrent en oscillation à la fréquence de l'excitateur générant ainsi un champ magnétique et un champ électrique orthogonaux. Cette configuration des deux est l'essence d'une OEM progressive.

Notre première tentative de Rectenna

Dans le cadre de nos TPE, nous nous sommes fixés comme objectif la réalisation d'une Rectenna. Le circuit figurant dans la thèse de Mr.Brown, semblait compliqué à réaliser, de ce fait nous sommes tournés vers un modèle simplifié :



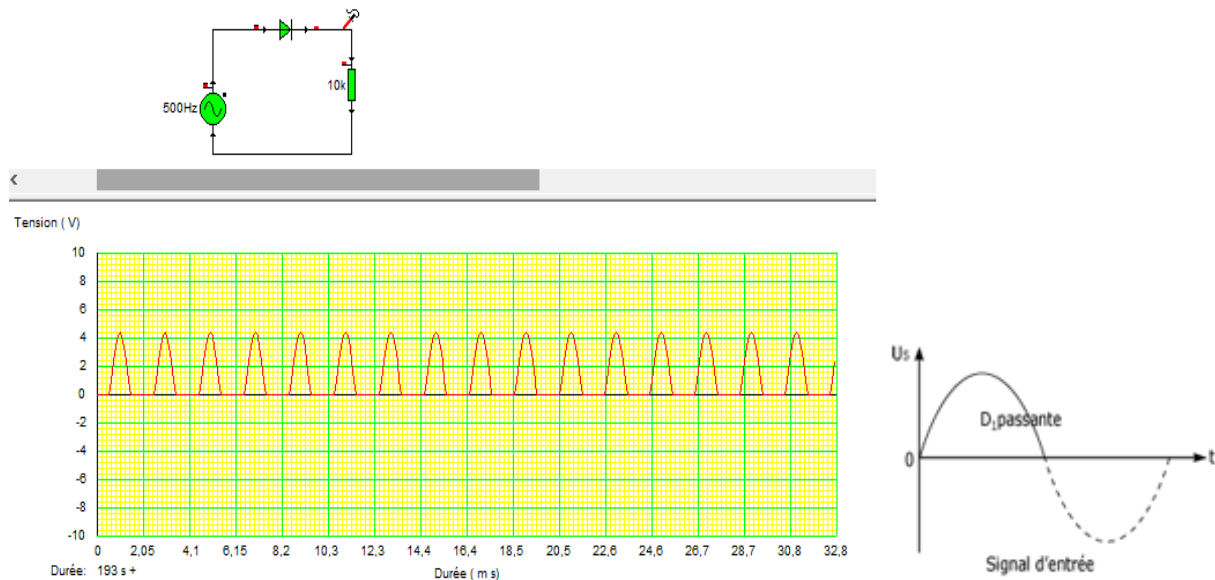
Composants:

- quatre diodes cristallines en germanium (1N34),
- deux condensateurs électrolytiques (100 μ F 50V),
- deux condensateurs céramiques (0.2 μ F 50V),
- une antenne de réception.

Bien que d'apparence simple, ce circuit présente beaucoup de surprises ! Pour comprendre son fonctionnement, nous nous sommes intéressés à la diode qui représente l'élément central du Rectenna puis aux condensateurs.

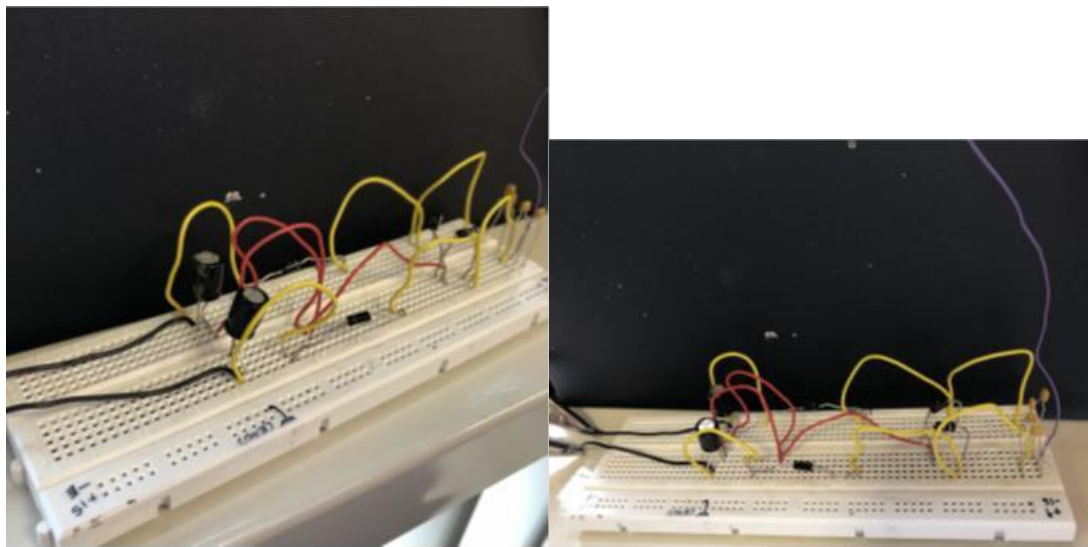
Fonctionnement d'une diode

A l'aide du logiciel « Crocodil Physics », nous avons simulé le fonctionnement de la diode alimentée par un GBF délivrant une tension alternative sinusoïdale de fréquence de 500 Hz et d'une amplitude de 5,0 V. La tension aux bornes de la résistance affiche la disparition de l'alternance négative : c'est le phénomène de redressement mono-alternance. En effet, ne laissant passer le courant que dans un sens, la diode supprime les alternances négatives de la tension sinusoïdale (diode bloquée). On observe alors seulement l'alternance positive de la tension comme l'indique le schéma ci-dessous.



Réalisation du circuit

Nous avons réalisé le montage sur une platine de test sans soudure. Un fil a servi d'antenne.



Cette tentative s'est soldée par un échec : le circuit n'a fonctionné qu'une fois. Nous pensions alors que cela pouvaient venir de :

- Connexions : les fils n'ont pas été soudés correctement.
- L'antenne qui n'est pas adaptée à la réception.

Conception d'une Rectenna plus élaborée

Pour résoudre les deux problèmes évoqués auparavant, nous avons réalisé le même montage mais en version portable comme la Rectenna. Toutes les connexions ont alors été soudées. Pour améliorer la réception des O.E.M, nous avons équipé ce montage d'une antenne parabolique fabriquée à partir d'une canette découpée puis limée. En effet, la parabole permet de réfléchir et focaliser les OEM sur les fils de l'antenne. La dimension de l'antenne a été choisie de façon hasardeuse.

Descriptif de l'antenne

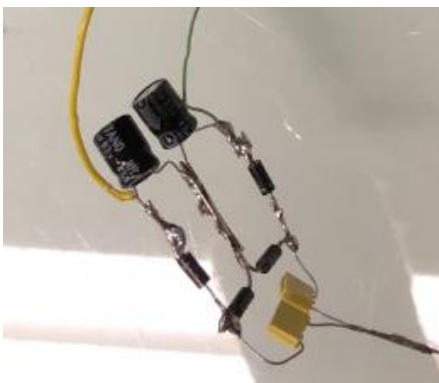


Le prototype s'avère fonctionnel !



Sur la photo ci-dessus, nous avons court-circuité les deux condensateurs pour les décharger. La tension aux bornes des condensateurs est alors nulle. Lorsque le circuit est abandonné sans court-circuiter les condensateurs, la mesure de la tension aux bornes des condensateurs augmente progressivement et atteint une valeur de 125,0 mV. Cela signifie que la Rectenna accumule de l'énergie !

Malheureusement le circuit électrique a cessé de fonctionner cela est dû sans doute à des soudures défectueuses au niveau des câbles de connexion... Nous avons donc reconstruit un autre modèle mais sans les câbles liants pour éviter l'éventuel problème d'une soudure défectueuse. Ci-dessous le dispositif en fonctionnement :



L'énergie récupérée est-elle suffisante pour alimenter un objet électrique de faible puissance ?

Estimation de l'énergie emmagasinée

L'énergie emmagasinée par un condensateur est donnée par la relation $W_{em} = \frac{1}{2} CU^2$
C étant la capacité du condensateur en Farad et U la tension entre ses bornes.

Dans notre dispositif, l'énergie est emmagasinée dans deux condensateurs de même capacité $C=47 \mu F$ est estimée à $1.4 \mu J$.

$$W_{em} = \frac{1}{2} CU_1^2 + \frac{1}{2} CU_2^2 = 1,4 \mu J$$

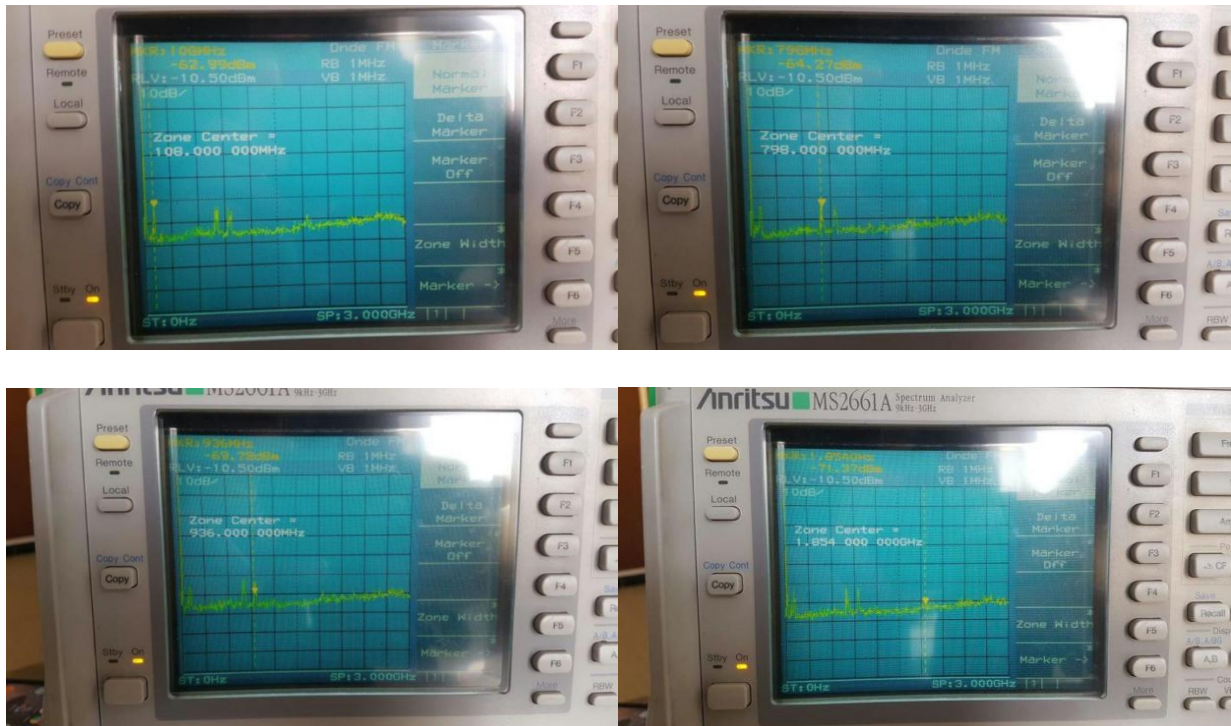
Une quantité d'énergie emmagasinée bien faible !

Pour approfondir nos connaissances sur le fonctionnement de ce circuit et avec l'aide de M. Bensetti notre professeur encadrant, nous avons pris contact avec des chercheurs de l'université de Bourgogne pour disposer de matériel et de conseils de professionnels.

Rencontre avec des chercheurs

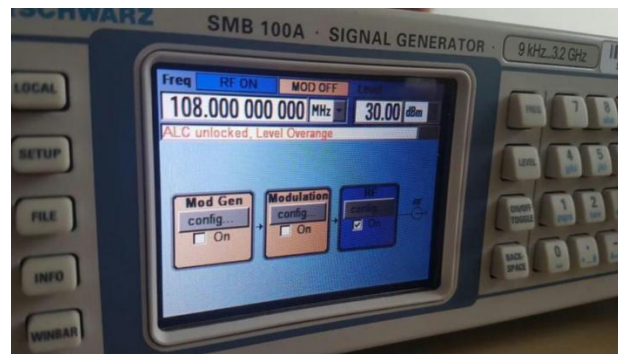
Nous avons eu la chance de nous rendre à la faculté des sciences et techniques de l'Université de Bourgogne dans le bâtiment Mirande où nous avons rencontré deux chercheurs et professeurs spécialistes dans le domaine des microondes. Nous avons observé à l'aide d'un analyseur de spectre quelles étaient les fréquences captées par notre dernier prototype Rectenna.

Nous avons constaté, comme le montre respectivement les quatre photos ci-dessous, que les fréquences les plus captées (marquées par un pique supérieur au profil général de l'intervalle) sont 108 MHz, 798 MHz, 954 MHz et 1824 MHz.



Connaitre les fréquences majoritairement captées par le circuit en question serait sans doute très utile pour l'optimisation du dispositif.

Fort de cette analyse spectrale des ondes captées par notre antenne nous l'avons soumise à la fréquence détectée : ici 108 MHz. Ainsi nous avons observé une augmentation significative de la tension de l'ordre de 1 mV par seconde.



Générateur en mode émission

Quelle partie du circuit capte ces fréquences ?

Pour répondre à cette question importante, nous avons opté pour un nouveau protocole testant les deux étages du dispositif : antenne et circuit.

Dans un premier temps, nous avons isolé le circuit électrique branché à un oscilloscope dans une enceinte métallique fermée jouant le rôle de cage de Faraday : un **réfrigérateur**. L'Antenne restant à l'extérieur. L'Analyseur de fréquence n'affiche aucun des quatre pics.

A son tour l'antenne a été isolée dans le réfrigérateur sans le circuit mais à notre grande surprise, nous avons constaté que le circuit capte !

Lorsque le circuit électrique est isolé et l'antenne ne l'est pas, l'oscilloscope n'indique rien.



Lorsque l'antenne de réception est isolée et le circuit électrique ne l'est pas, l'oscilloscope indique les quatre pics de fréquences précédemment présentés.



Ces deux observations nous indiquent que ce n'est pas l'antenne (dans ce cas un fil électrique) qui capte les OEM mais le circuit électrique en question.

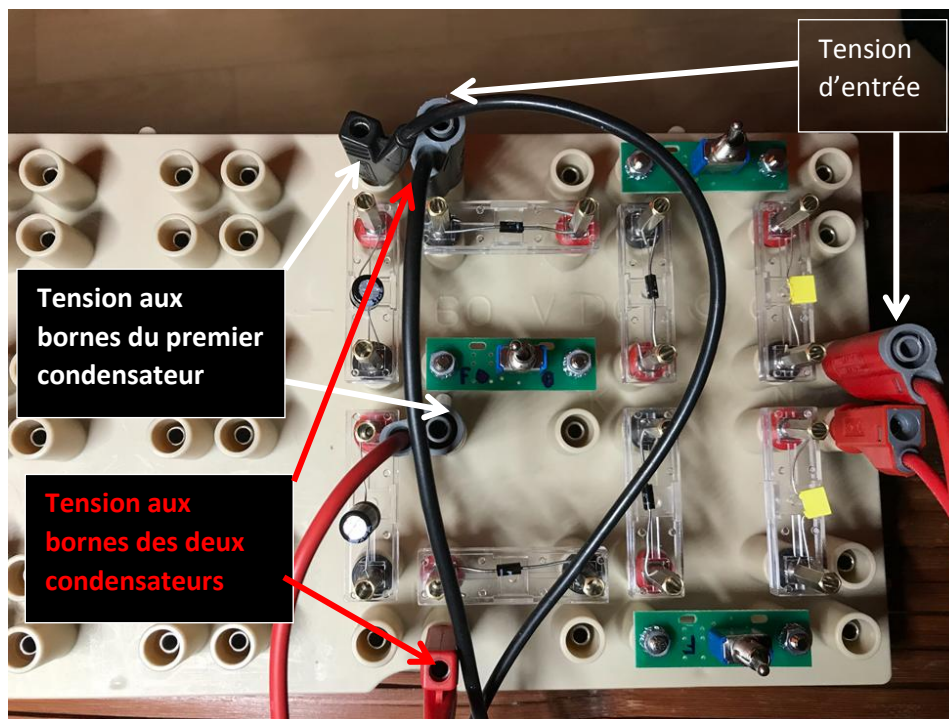
Quel domaine d'onde électromagnétique devons-nous capter pour une bonne efficacité ?

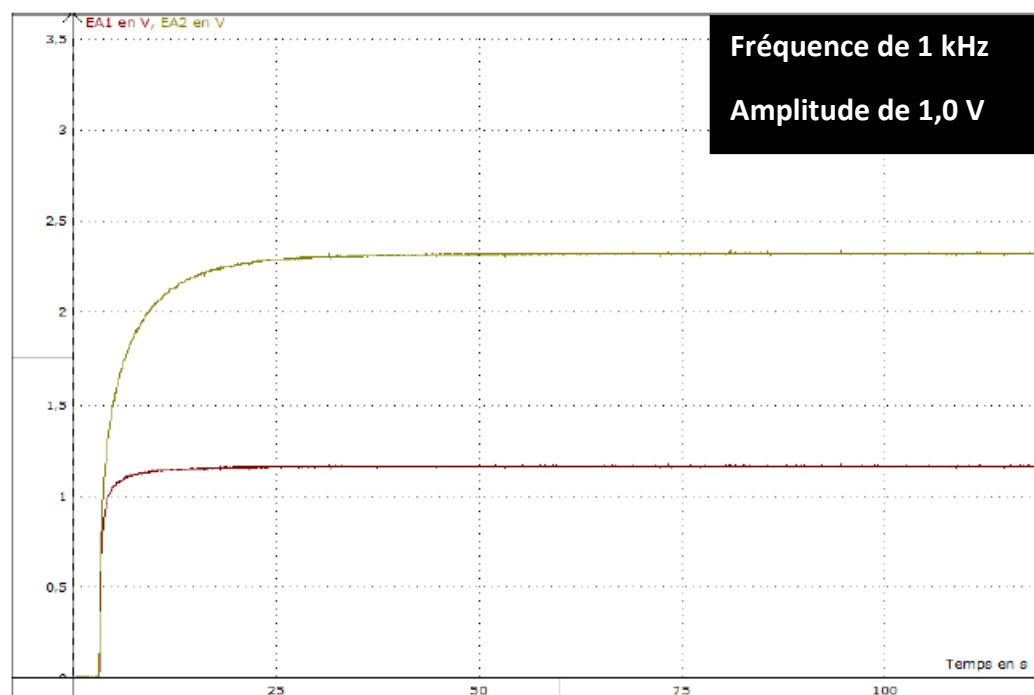
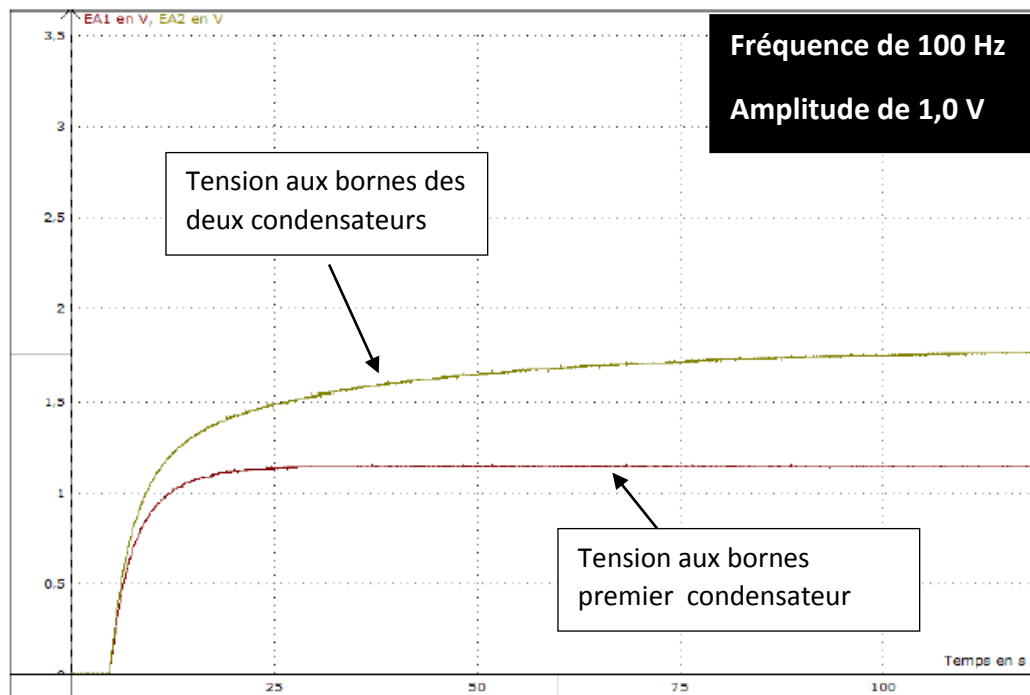
Pour tenter de répondre à cette problématique, nous avons réalisé un nouveau montage sur une platine de test et décidé d'imposer à ce circuit des tensions excitatrices alternatives sinusoïdales de fréquences de plus en plus élevées pour tester sa réponse en haute fréquence. Les tensions excitatrices ont été appliquées au niveau de l'emplacement de l'antenne réceptrice (voir montage ci-dessous).

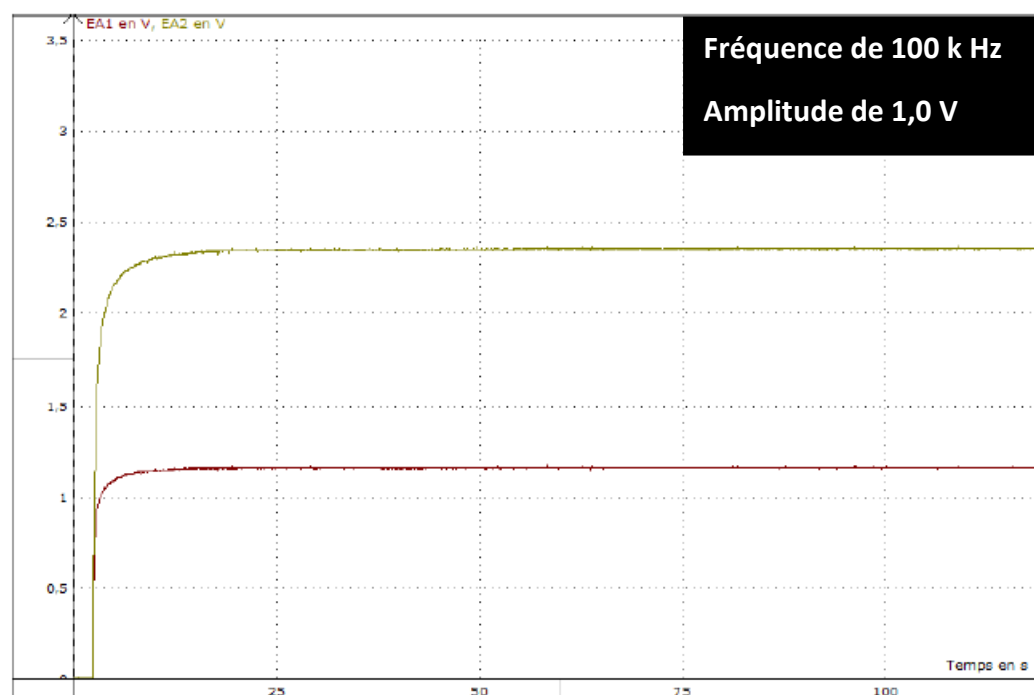
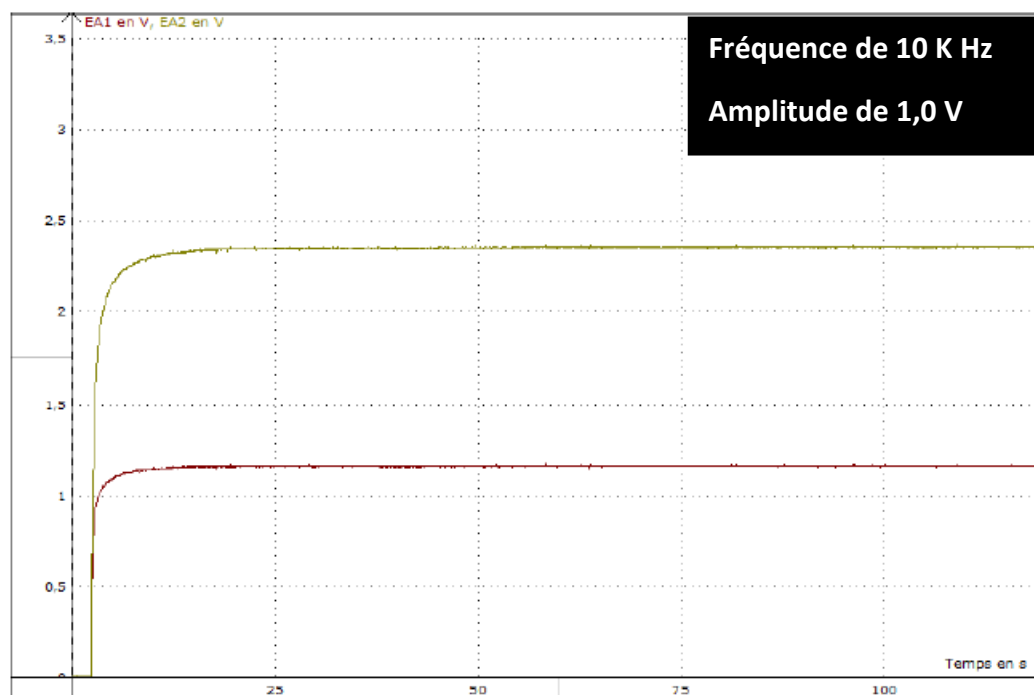
Le premier générateur que nous avons utilisé est celui de notre lycée c'est un METRIX GX240. Il nous a permis de réaliser nos premières mesures en excitant le circuit à des fréquences de 100 Hz, 1 KHz, 10 KHz, 100 KHz et enfin de 1 MHz qui est la limite de ce générateur.

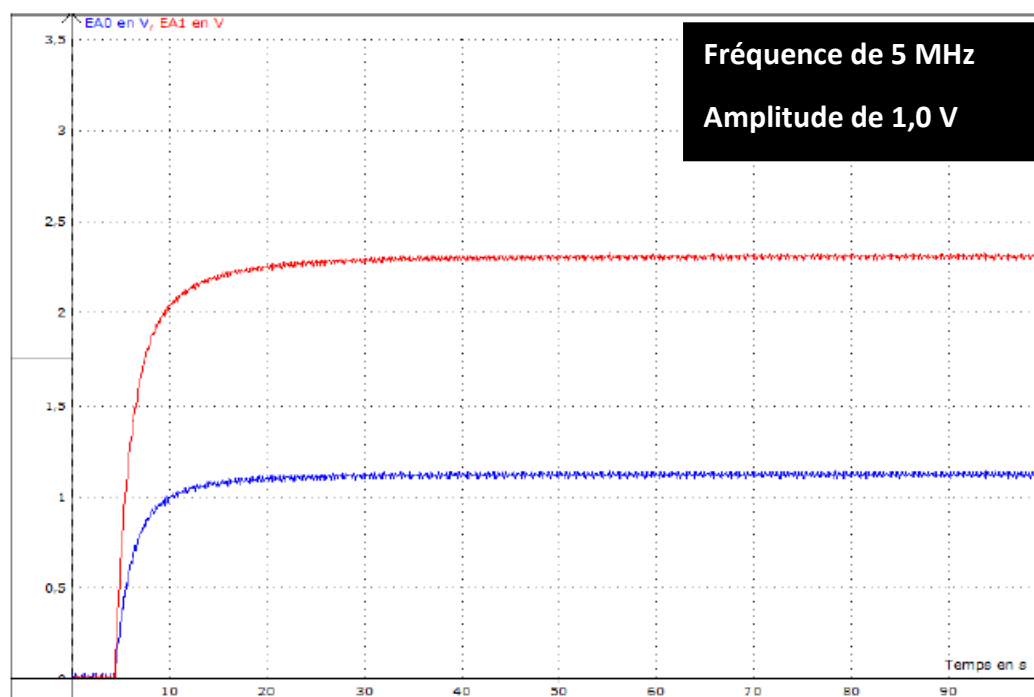
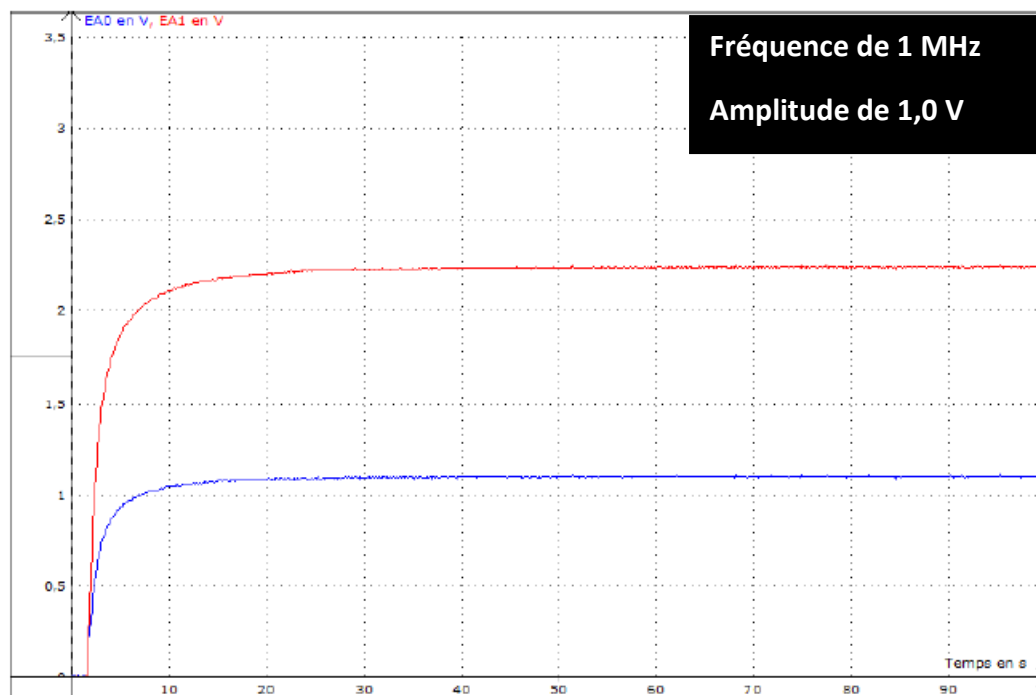
Pour tester à des fréquences encore plus élevées, nous avons utilisé un générateur « HEVLET PACKARD 33120 A » emprunté à l'université de Bourgogne. Ce dernier permet de délivrer des signaux sinusoïdaux allant jusqu'à 15 MHz.

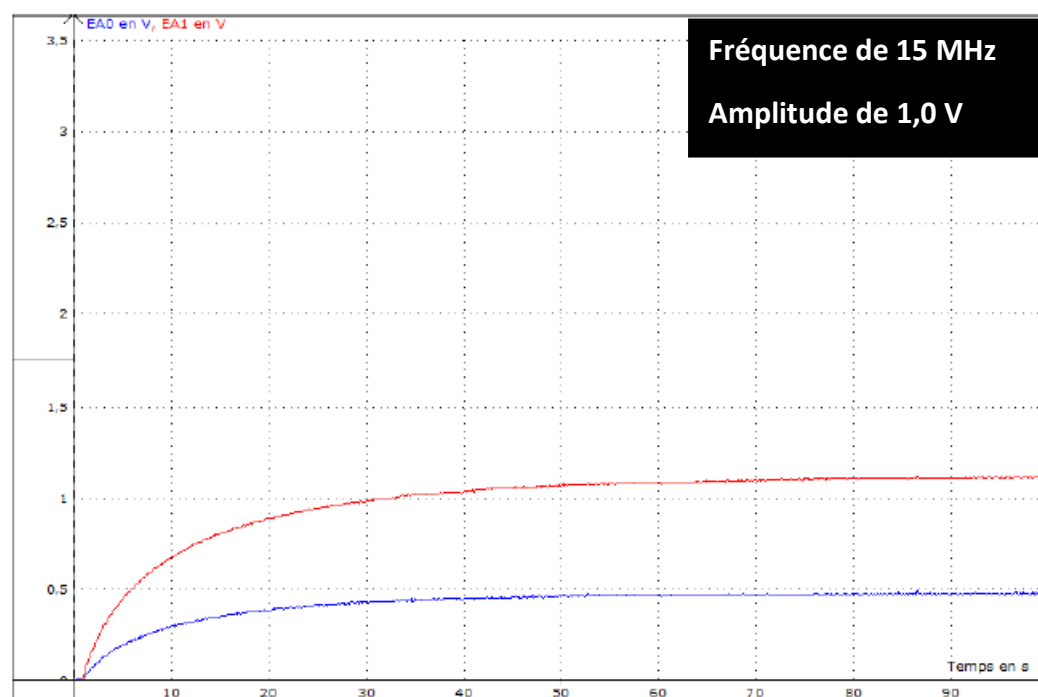
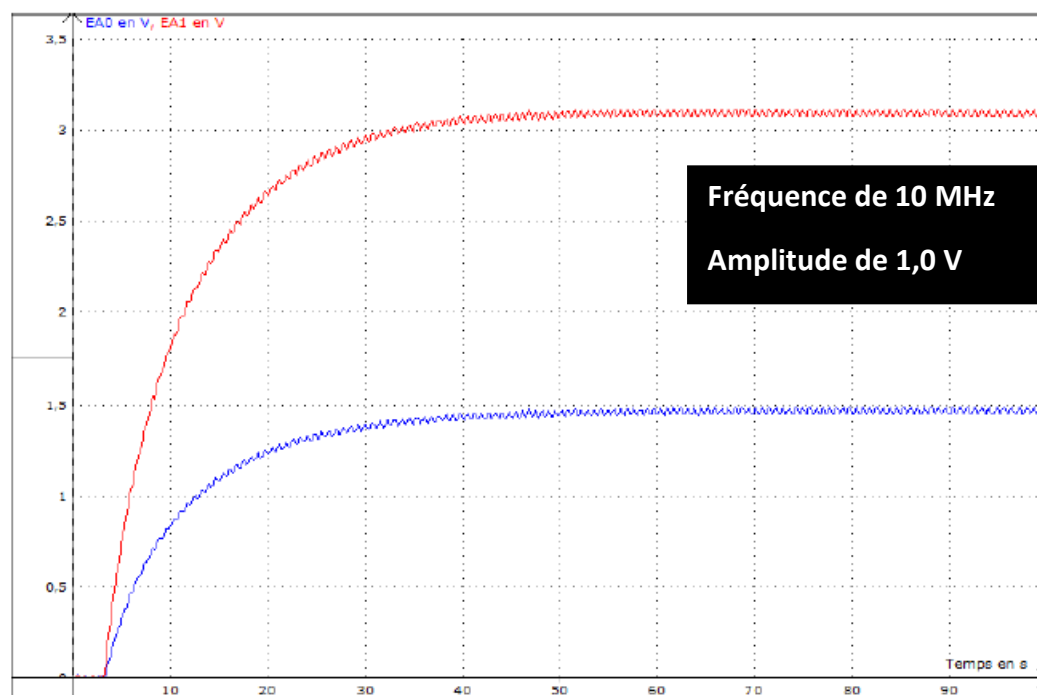
Les tensions de sorties ont été mesurées aux bornes des deux condensateurs à l'aide d'une carte d'acquisition SYSAM-SP5. Ci-dessous figure le montage ainsi que les courbes acquises à différentes fréquences.











Les résultats de ces expériences montrent que la réponse du circuit dépend de la fréquence de la source excitatrice :

- A très basses fréquences, la charge des deux condensateurs est très lente et la valeur de la tension entre les bornes des deux condensateurs atteint environ 1,7V.
- Lorsque la fréquence augmente mais reste inférieure à 10 Mhz, la charge est de plus en plus rapide et la valeur maximale de la tension en charge atteint environ 2,3 V.
- A 10 MHz, des oscillations apparaissent au niveau des tensions ! « Etonnant ! » La tension entre les bornes des deux condensateurs atteint environ 3,2 V.
- A 15 MHz, la charge redevient lente et la tension maximale, entre les bornes des deux condensateurs, chute à environs 1,2 V !

Ces observations nous amènent à la conclusion, que notre choix d'une fréquence donnée conditionnera la taille du circuit ainsi que le choix de ses composants.

Le comportement étonnant de ce circuit mérite d'être approfondi...

Le retour vers les chercheurs

Le test de notre montage avec un générateur hyperfréquence (1-10 GHz) a permis d'analyser notre montage dans le domaine des hyperfréquences ou microondes. Cette analyse du comportement en fréquence de notre montage effectuée avec M. Stuerger et Rossignol a permis de comprendre l'origine des dysfonctionnements observés.

Synthèse sur l'origine des dysfonctionnements :

La première conclusion est que si notre circuit capte indéniablement des signaux haute-fréquences, le rôle de notre antenne apparaît comme négligeable. Les fils de connexions captent autant, sinon mieux que l'antenne.

La seconde conclusion concerne la diode utilisée. Les diodes dites « classiques » ne fonctionnent plus correctement en haute fréquence, et encore moins en hyperfréquences. Il faut impérativement utiliser des diodes rapides spécifiques pour les hautes fréquences comme les diodes Schottky. Sur la base de ces remarques, nous avons proposé un second montage.

Notre deuxième montage

Le doublet demi-onde : Le premier point d'amélioration est l'antenne. Le type le plus simple à utiliser est l'antenne dipôle ou antenne doublet demi-onde. Elle est constituée de deux brins métalliques dont la longueur totale des deux brins est proche de la demi-longueur visée. Le gain d'une antenne est défini comme le rapport des puissances par unité de surface de l'antenne donnée et d'une antenne hypothétique isotrope. Dans le cas du doublet demi-onde, le gain théorique est proche de 1,8. Ce qui signifie que vis-à-vis d'une antenne hypothétiques isotrope, le doublet demi-onde concentre d'un facteur 1,8 l'énergie électromagnétique.

Les longueurs d'ondes associées aux fréquences de la téléphonie mobile et du wifi sont les suivantes :

GSM	900 MHz	$\lambda = 33 \text{ cm}$	$\lambda/2 = 16 \text{ cm}$
GSM	1,8 GHz	$\lambda = 16 \text{ cm}$	$\lambda/2 = 8 \text{ cm}$
Wifi, four	2,45 GHz	$\lambda = 12 \text{ cm}$	$\lambda/2 = 6 \text{ cm}$

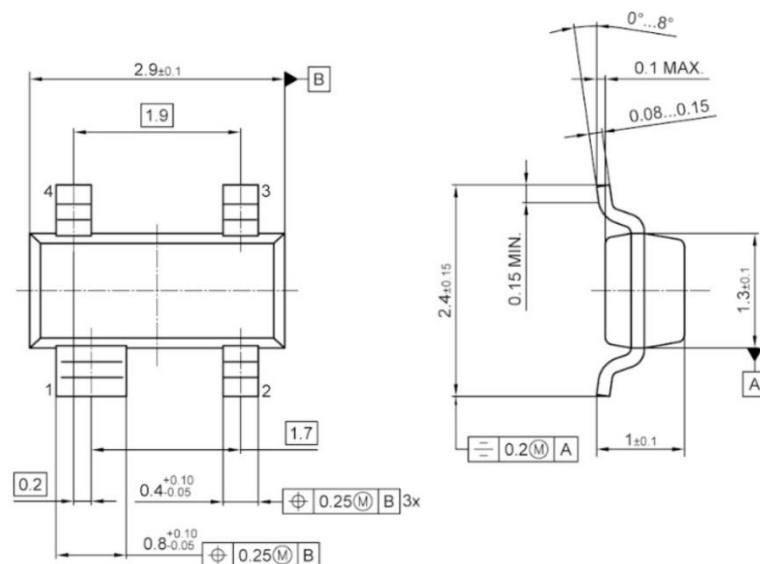
Afin de capter ces trois fréquences, nous avons réalisé un doublet demi-onde de 8 cm. Ce doublet est réalisé en tige pour poste de soudure électrique à arc (diamètre 1,5 mm).

La self d'arrêt : La présence d'ondes électromagnétiques se traduit par des courants induits sur les brins du dipôle. C'est ce courant de charge que nous souhaitons récupérer pour le stocker dans un condensateur. Une solution consisterait à relier chaque borne de l'antenne à un microampèremètre. Hélas cette configuration ne fonctionne pas. En effet, les courants induits sont à la fréquence de l'onde électromagnétique et les multimètres et autres galvanomètre ne sont pas susceptibles de fonctionner à ces fréquences. Il est impératif de redresser ces courants hautes fréquences pour les rendre mesurables par un galvanomètre par exemple. C'est le rôle crucial joué par la diode. Toutefois avant de passer à la diode, un élément très important doit être ajouté à l'antenne pour faciliter la mesure par le galvanomètre.

En effet, il est indispensable de relier les deux brins de l'antenne par une self d'arrêt (ou choke-coil en anglais). Cet élément laisse le courant redressé s'écouler dans le dispositif de redressement en bloquant les hautes fréquences au niveau de l'antenne. Cet élément maximise la capacité de redressement du dispositif. La self est réalisée à partir de fil émaillé de 0,3 mm de diamètre. Le dispositif optimal a été obtenu en réalisant 6 spires en bobinant sur un forêt de 4 mm. Cet élément relie électriquement les deux brins de l'antenne.

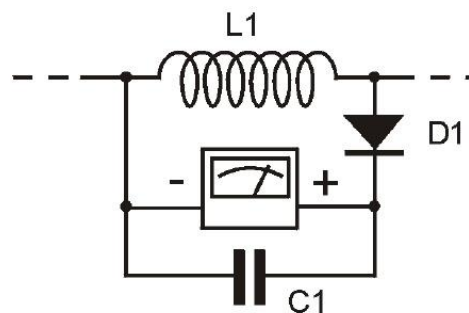
La diode et le condensateur : Comme nous l'avons expliqué les diodes de commutation ne fonctionnent plus en haute fréquences. La classique 1N4148 est fonctionnelle jusqu'à des fréquences de commutation d'environ 100 MHz avec un temps de recouvrement inverse inférieur à 4 ns. La limitation de la capacité à redresser en haute fréquence provient de la capacité parasite parallèle à la diode. Pour les diodes classiques comme les 1N4148 et 1N914 elle est de l'ordre de 4 pF. Cette capacité va se comporter comme un court-circuit aux hyper fréquences, en laissant passer aussi bien les alternances positives que négatives et annulant la capacité de redressement de la diode à ces fréquences.

Pour les hyperfréquences, il est nécessaire d'utiliser des diodes rapides dite Schottky. Le choix de la diode s'est porté sur une diode Schottky BAT62 de chez *Infineon*, qui possède une capacité parasite de 0,5 pF. Cette diode est capable de redresser des signaux jusqu'à plus de 3 GHz. Son prix est modique (0,75 Euros chez Conrad). Son seul inconvénient est sa taille minuscule car elle existe uniquement sous forme de CMS de type SOT143. Les dimensions apparaissent sur la figure ci-contre.



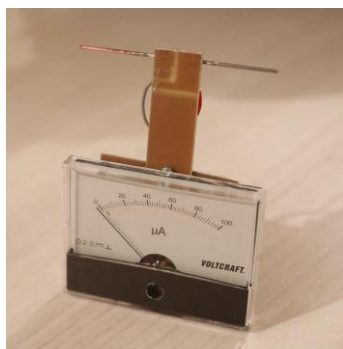
Il est nécessaire de la manipuler avec une pince à épiler et la souder avec une loupe frontale et un éclairage adéquat. Nous avons utilisé les pates 1 et 4 (cathode). Un condensateur de 1 nF, en parallèle de la diode, assure un lissage du courant redressé par la diode.

La Figure ci-dessous présente le schéma global de notre nouveau montage. Nous avons choisi de visualiser directement le courant redressé par un galvanomètre de 100 μA . Ce dernier est relié aux bornes de la diode.



Les premiers tests encourageants du deuxième montage

Notre dispositif réagit devant les téléphones en numérotation, les serveurs wifi. Il fonctionne au-delà de nos espérances devant les fours microondes en fonctionnement avec des déviations du galvanomètre proche de 100%. Notre nouveau montage fonctionne en présence de microondes et visualise le niveau d'irradiation.



Quelles perspectives donner à ce montage

Les perspectives sont de calibrer la sensibilité de notre dispositif avec l'aide de M. Stuergera et Rossignol. L'objectif est de mesurer la réponse en fréquence de notre dispositif pour comprendre sa neutralité devant certains téléphones. A moyen terme, le second objectif est d'optimiser la capacité de l'antenne.

Conclusion

A travers notre démarche, exclusivement expérimentale, avec la réalisation et l'analyse de plusieurs montages constitués de diodes, de condensateurs et d'une antenne réceptrice nous pouvons tirer certaines conclusions.

Si le premier montage capte indéniablement des signaux haute-fréquences, le rôle de notre antenne apparait comme négligeable. Les fils de connexions captent autant, sinon mieux que l'antenne !

Le dernier dispositif associant une diode Schottky de type CMS (Composant Monté en Surface) et une antenne double demi-onde a démontré la capacité de capter les ondes émises par les portables en fonctionnement et les fours microondes.

Notre dispositif Rectenna reste prometteur ! Cependant, de nombreuses modifications et améliorations doivent être apportées à court et à moyen terme pour améliorer son efficacité :

- Optimiser le dimensionnement de l'antenne réceptrice ;
- Se servir de nos premiers prototypes comme unité de stockage et l'adapter à notre nouvelle antenne.
- Multiplier les unités de récupération pour augmenter la capacité de récupération d'énergie.

Pour conclure, la Rectenna comme l'a nommée Mr Brown en 1964, reste un dispositif théoriquement très intéressant pour récupérer de l'énergie perdue et contribuer ainsi à la lutte contre la pollution et ses conséquences de façon durable.

Albert Einstein : “Une Personne qui n'a jamais commis d'erreurs, n'a jamais tenté d'innover” .

Nous sommes et resterons motivés pour faire aboutir ce projet...

Nos remerciements à

M. Didier Stuergea et Jérôme Rossignol professeurs chercheurs au laboratoire interdisciplinaire Carnot de Bourgogne. UMR 6303 CNRS, pour nous avoir accordé, à multiples reprises, le temps pour approfondir notre compréhension théorique de la Rectenna. De nous avoir accueilli dans leur laboratoire et nous permettant de manipuler des appareils pour aboutir à des mesures de grandes précisions et de nous avoir aidé à effectuer des tâches complexes.

M. Bensetti pour avoir passé de nombreuses heures à nous encadrer de façon extra-scolaire, de toujours avoir pris le temps de répondre à nos questions, de nous guider dans nos protocoles et de nous avoir permis de faire la rencontre avec deux chercheurs de la faculté universitaire de Dijon. De nous emmener à Paris pour présenter notre projet.

Lycée Charles de Gaulle et particulièrement à son proviseur, M. Meunier, qui nous ont autorisé à mener ce projet dans de bonnes conditions (en adaptant les disciplines de notre TPE, nous autorisant l'accès à des salles de classe) et d'avoir accepté notre demande de participation aux Olympiades de Physique.

Organisateurs des Olympiades de Physique pour nous permettre de mettre en avant le travail que nous avons mené depuis le commencement de notre TPE et d'avoir accepté notre participation malgré un retard dans l'envoi du rapport.