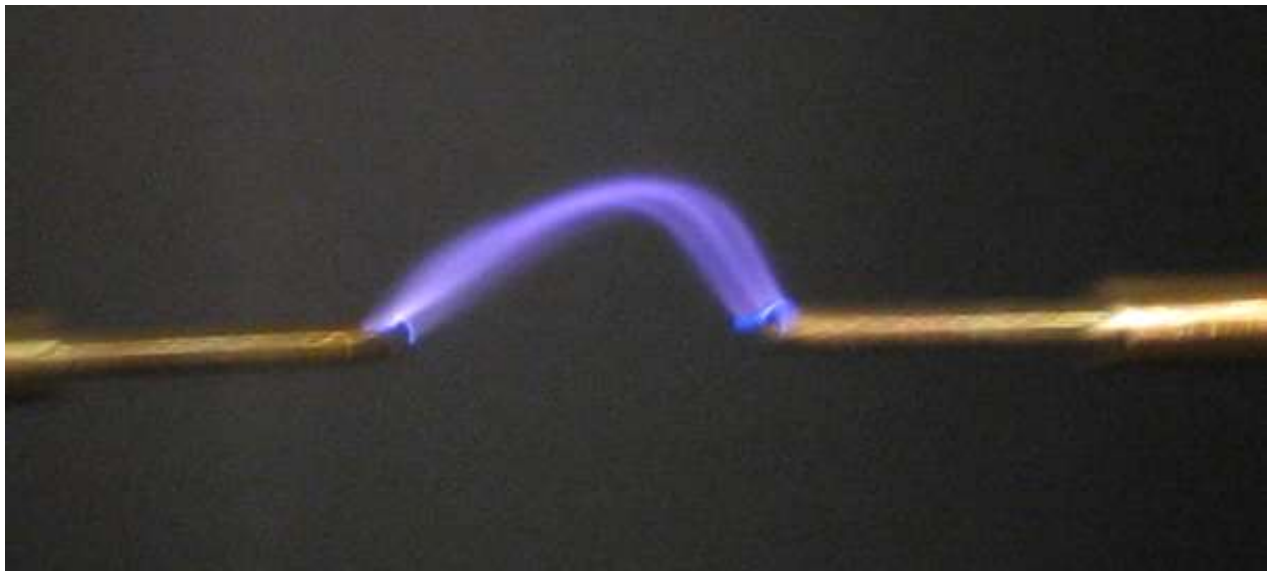


Remi Ounadjela -Victor Mizrahi - Kaiqiang Zhang

PLASMA MUSICAL



LLG

Lycée Louis le Grand



2009-2010

Remerciements:

Nos remerciements vont tout particulièrement à Jacques Jundt chercheur au centre de recherche de Schlumberger à Boston (USA) qui nous a encouragé dans les moments difficiles. Nous avons grâce à lui réussi à générer un son à partir d'un arc électrique. Nous remercions également Philippe Salamitou pour le matériel qui a bien voulu nous prêter pour conduire cette expérience.

Résumé :

Nous proposons de réaliser un plasma musical commandé par un circuit électrique dont le principe consiste à charger une capacité à l'aide d'un générateur de tension continue et à décharger cette capacité dans un transformateur haute tension dont le secondaire est relié à deux électrodes. Le son est émis par la variation de volume de l'air généré par le plasma entre ces deux électrodes. Le contrôle de la fréquence de génération du plasma est assuré par un circuit électrique de commande dont une entrée est le signal audio.

Les deux principales difficultés de ce circuit sont la commande de l'interrupteur et la modulation du signal électrique permettant de restituer le son. Nous avons opté pour une démarche progressive qui nous a permis de comprendre le fonctionnement des différents types d'interrupteurs utilisables pour ce circuit. Ainsi nous avons réussi à créer un arc électrique avec des interrupteurs à seuil telle que les tubes à gaz ou le SIDAC dont l'utilisation est très simple mais malheureusement dont les performances sont limitées. Nous avons ensuite utilisé un Thyristor et un IGBT, les commandes de ces interrupteurs sont plus complexes par contre leurs performances d'ouvertures et de fermetures sont meilleures.

Nous avons réussi à restituer un son dont la qualité s'est ensuite nettement améliorée grâce à plusieurs modifications successives. La première méthode consiste à moduler le son en fréquence en utilisant l'entrée 5 de l'oscillateur 555. Cette entrée permet dans une plage limitée de tension de moduler en fréquence le signal d'entrée.

La seconde méthode utilise un modulateur Delta-Sigma. Le modulateur génère à sa sortie une série d'impulsions numériques dont l'intervalle des impulsions reproduit le rythme du signal audio. Ce circuit utilise un comparateur et un flip-flop permettant de transformer un signal analogique en un signal numérique et d'autres composants logiques pour obtenir un signal de commande de forme carrée. La compréhension et la réalisation de ce circuit de commande de l'interrupteur est beaucoup plus complexe que la modulation en fréquence. Cependant ce circuit nous a permis d'aborder la conversion des signaux analogiques en signaux numériques et a permis de reproduire un son de meilleure qualité.

Table des matières

I. Introduction	4
II. L'Arc électrique musical	5
III. Description du circuit électrique générant un arc électrique	6
IV. Calcul théorique de la fréquence de commutation de l'interrupteur	9
V. Résultats expérimentaux, formation de l'arc électrique	10
VI. Haut parleur à plasma.....	18
A) MODULATION DELTA SIGMA	20
B) REPRÉSENTATION DES SIGNAUX ÉLECTRIQUES DANS LE CIRCUIT	22
B) MODULATION DU SIGNAL AUDIO	26
C) FONCTIONNEMENT DU HAUT PARLEUR A PLASMA.....	27
VII. Conclusion.....	28
Annexes.....	32
VIII. Description des éléments du circuit	32
IX. Résultats expérimentaux obtenues avec les interrupteurs à seuil.....	38
X. Rembobinage du primaire du transformateur.....	44
XI. Schéma du circuit de modulation Delta Sigma de l'audio	45

I. Introduction

Nous avons abordé ce projet de réalisation du haut parleur à plasma comme un défi, en effet nous voulions comprendre comment réaliser de manière pratique un haut parleur dont le son est généré par le plasma en contact de l'air.

On doit l'invention de ce type de haut parleur à William Duddell connu sous le nom de « singing arc » en 1900. L'arc électrique ou le plasma généré par le champ électrique entre deux électrodes crée une variation de pression de l'air environnant et produit ainsi un son. La variation de pression a pour origine une variation de température due à la génération de l'arc électrique. Contrairement aux hauts parleurs classiques utilisant une membrane pour produire une variation de pression, le haut parleur à plasma ne requiert aucun élément au contact de l'air. Par contre la membrane d'un haut parleur classique possède une masse, et limite de cette manière la réponse de ce haut parleur dans une bande de fréquence. En s'appuyant sur nos cours, une masse et un ressort possède une fréquence de résonance qui participe à la distorsion du son. L'avantage du haut parleur à plasma, est de ne pas utiliser un principe utilisant une masse et permet par conséquent de reproduire un son en théorie à des fréquences très élevées. Il faut également savoir qu'il est inutile de reproduire un son au delà de 20 kHz car notre oreille est incapable de percevoir en général des fréquences supérieures à 16 kHz.

Les connaissances pour réaliser un haut parleur à plasma vont au delà de notre savoir acquis au Lycée. Nous tenons à remercier particulièrement un chercheur travaillant aux Etats-Unis (voir remerciements) qui nous a guidé dans notre projet, nous avons grâce à ses conseils par étapes successives appris à utiliser les différents composants électroniques utilisés dans ce circuit.

Le haut parleur à plasma est composé de deux circuits, le circuit de commande pour déclencher l'interrupteur, et le circuit de puissance capable de générer une tension élevée de l'ordre de 20 000 V au borne du secondaire du transformateur. L'arc électrique est formé en chargeant et déchargeant une capacité au borne du primaire d'un transformateur, le circuit étant alimenté par un générateur continue. La difficulté de ce type de circuit est de commuter une tension de l'ordre de 200 V à une fréquence élevée. Une part importante de ce projet fut de réaliser à l'aide de différents types d'interrupteurs cette commutation électrique. Nous avons commencé par utiliser des interrupteurs simples, telle que les interrupteurs à seuil, (SIDAC, tube à gaz) mais devant les limitations importantes de ces interrupteurs nous avons ensuite utilisés des IGBT et MOFSET. Grace à ces interrupteurs plus performants, nous avons pu utiliser deux circuits de commande pour reproduire un son. Le premier circuit utilise principalement une horloge 555 dont une entrée permet de moduler en fréquence le signal audio. Ce circuit a permis de reproduire un son mais les limitations de la modulation en fréquence de l'horloge 555 ne permettent pas de reproduire un son de bonne qualité. Le deuxième circuit utilise une modulation Delta Sigma qui est une modulation proche de la modulation d'amplitude. Deux raisons essentielles nous ont guidées à choisir ce type de modulation, cette technique doit permettre de reproduire un signal électrique de manière plus fidèle et la seconde raison est notre curiosité à utiliser une technique permettant de convertir des signaux analogiques en signaux numériques.

II. L'Arc électrique musical

A) CREATION DE L'ARC ELECTRIQUE

1) Qu'est ce qu'un arc électrique?

Un arc électrique est un courant électrique qui devient visible dans un milieu normalement isolant.

2) Comment se crée l'arc électrique?

L'arc électrique ne peut se créer que si le milieu isolant se ionise, cette ionisation se fait d'autant plus facilement que les surfaces conductrices sont proches. Une fois ionisé, le gaz crée un canal conducteur qui entraîne le reste de la charge présente sur la surface de départ .

Cependant, pour ioniser ce gaz, il est nécessaire d'atteindre son champ disruptif c'est-à-dire la valeur maximale du champ électrique que le gaz puisse supporter avant que l'arc électrique ne se crée. Pour ce qui concerne l'air, son champ disruptif est évaluée à 3600V/mm dans un air sec et tombe à environ 1000V/m dans un air humide.

Une des caractéristiques des électrodes utilisées dans notre expérience est qu'elles permettent l'effet de pointe. Il s'agit d'une propriété physique qui permet à un petit volume de matériaux de générer un champ électrique beaucoup plus grand qu'un plus grand volume de matériaux. Ainsi, les électrons des atomes proches de la pointe d'une électrode sont littéralement arrachés. Cet atome qui a perdu un électron devient ionisé et attire un électron de l'atome voisin et ainsi de suite. Par ailleurs, lorsqu'un électron rejoint la couche électronique d'un atome, il dégage des photons qui fournissent alors suffisamment d'énergie aux atomes voisins de l'arc électrique pour qu'ils vibrent plus d'où la création de chaleur. Cette circulation d'électrons et d'atomes ionisés dans de hautes températures fait de cet arc électrique un créateur de plasma.

B) LA BULLE DE PLASMA, SON ROLE DANS L'EMISSION D'ONDES SONORES.

Dans un haut-parleur traditionnel, le son est émis via les membranes. Ces derniers sont actionnés grâce au champ magnétique de la bobine mobile (voir schéma précédent). Il se produit des pertes d'authenticité du son surtout lorsque la fréquence du son est élevée car l'action mécanique ne suit plus alors la fréquence de la tension (due à la masse des éléments mobiles du haut parleur).

Dans cet arc électrique musical, le gaz ionisé agit directement sur l'air, la variation du volume du plasma fait alors varier la pression de l'air autour de lui-même créant ainsi des ondes. Plus le courant est grand, plus le volume de plasma occupe de plasma et inversement. Il semble que le principe du haut parleur à plasma, est un avantage car l'arc électrique interagit directement sur l'air et il n'y a plus de pièces mécaniques pour transmettre le son dans l'air. Par contre l'arc électrique dépend de la qualité de l'air, de son humidité, pour reproduire un son dans n'importe quelle condition, il faudrait contrôler le gaz environnant, par exemple injecter de l'argon ou de l'hélium sur les électrodes.

III. Description du circuit électrique générant un arc électrique

III.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CIRCUIT ELECTRIQUE

Le circuit électrique proposé permet de générer un arc électrique aux bornes de deux électrodes, en utilisant une alimentation continue. Le principe consiste à charger une capacité à travers une résistance, (cours de terminal sur la charge et décharge d'une capacité) et de la décharger dans un transformateur pour élever la tension électrique. La tension au borne du secondaire doit être suffisamment élever pour créer un arc électrique. La deuxième partie du projet consiste à reproduire un son en utilisant l'arc électrique comme un haut parleur (invention de William Duddell (1899) qui fut le premier à produire un son en faisant vibrer un arc électrique entre deux électrodes).

Un son est crée en faisant varier l'amplitude et la fréquence de la pression acoustique. Par corrélation, il est donc nécessaire de faire varier en fréquence et en amplitude l'intensité de l'arc électrique. Le circuit proposé ne permettant que de faire varier la fréquence des impulsions électriques, nous proposons deux circuits qui permettront de moduler la fréquence des impulsions pour reproduire un son. Le premier circuit utilise principalement une horloge 555 dont une entrée permet de moduler la fréquence du signal. Le second circuit utilise une modulation Delta Sigma permettant de convertir le signal audio en une série d'impulsions dont les intervalles entre les impulsions permettent de reproduire l'information contenu dans le signal audio.

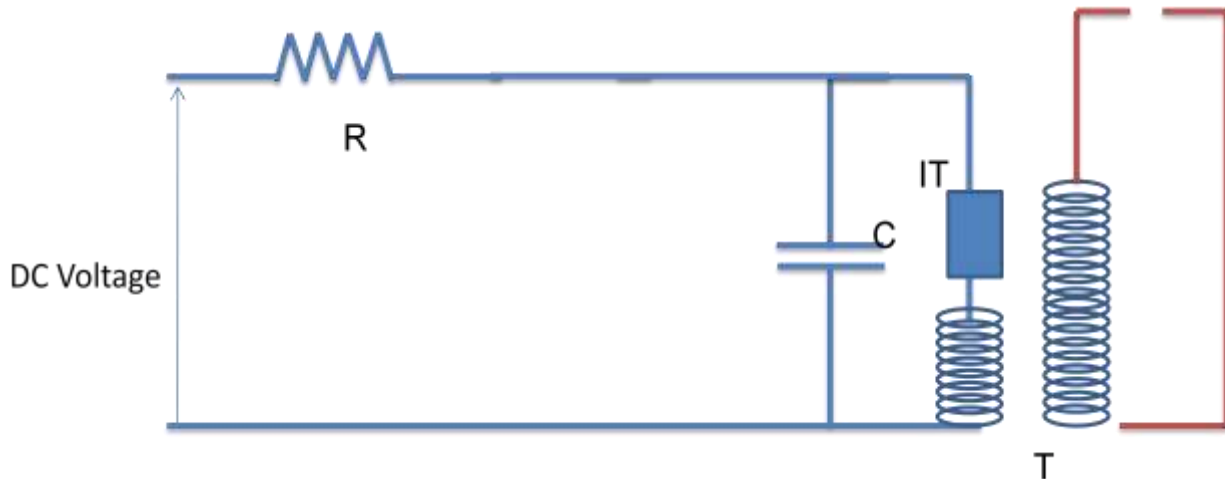


Figure 1: circuit électrique permettant de générer un arc électrique

III.2 GENERATION EN FREQUENCE D'UNE TENSION ELECTRIQUE A LA SORTIE DU TRANSFORMATEUR

La variation en fréquence du signal électrique est générée de deux méthodes différentes.

La première méthode consiste à charger une capacité jusqu'à une tension V_0 (95V dans l'exemple sur la courbe) défini par la tension de commutation de l'interrupteur. A ce seuil l'interrupteur décharge la capacité brutalement dans le primaire du transformateur et de nouveau le condensateur se recharge et le cycle recommence. Les interrupteurs à seuil que nous avons essayé dans le circuit sont le tube à décharge à gaz, le Sidac et le Thyristor avec une commande particulière de la gâchette, (voir annexe pour les résultats).

Nous avons écrit un programme sur Excel montrant l'influence des paramètres du circuit définissant la période de la décharge du condensateur. (théorie développé en paragraphe suivant)

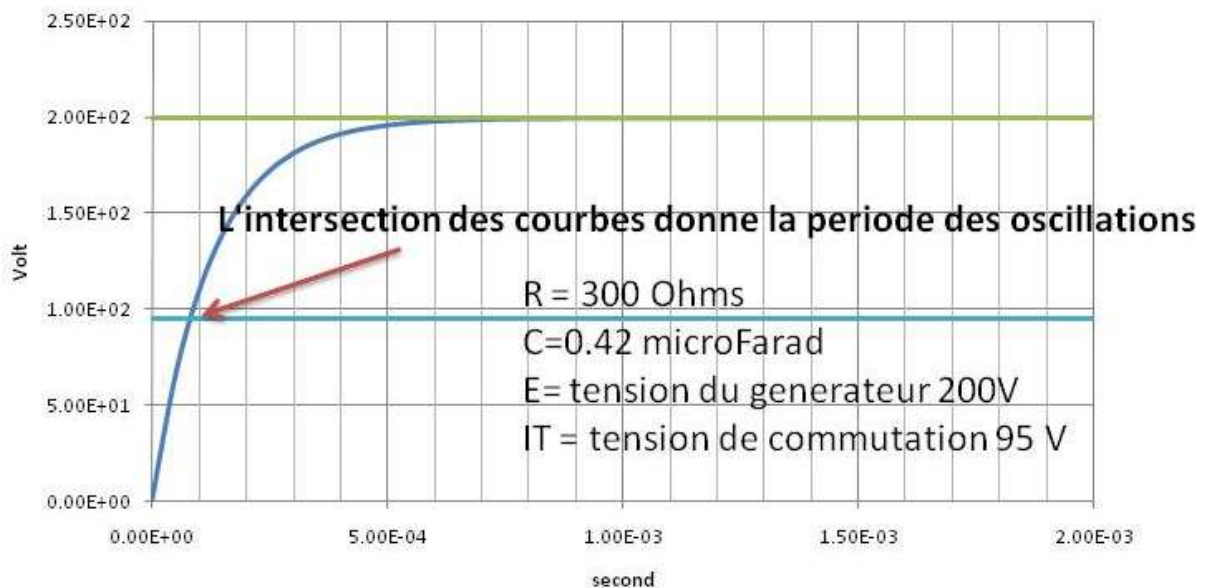


Figure 2 : Paramètres définissant la période de décharge du condensateur

Le point d'intersection sur la figure entre la courbe de charge du condensateur et celle de la tension du commutation de l'interrupteur définit la période des oscillations de charge et de décharge. Cette période est définie par la constante RC, la tension d'alimentation et le seuil en tension de commutation de l'interrupteur. Pour souligner l'influence du seuil de commutation, un niveau de commutation plus élevée que celui sur la courbe (95V) prolonge le temps de charge de la capacité et donc la période est plus grande (fréquence de charge et de décharge est plus faible), par contre un seuil de commutation plus faible diminue le temps de charge de la capacité et la période est plus faible.

La copie d'écran de l'oscilloscope permet d'illustrer la période de charge et de décharge du condensateur .

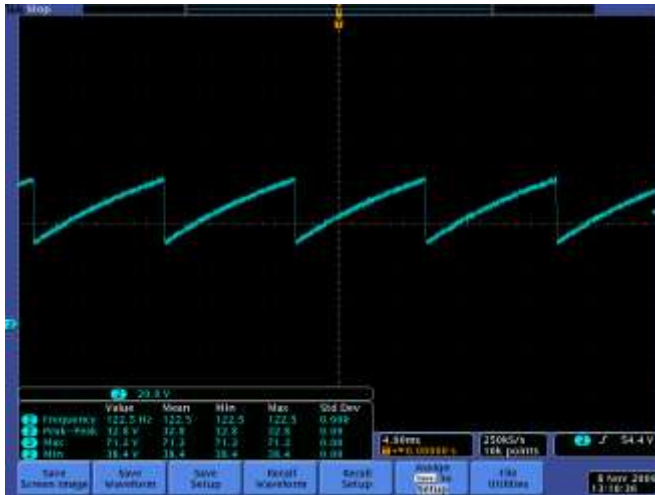
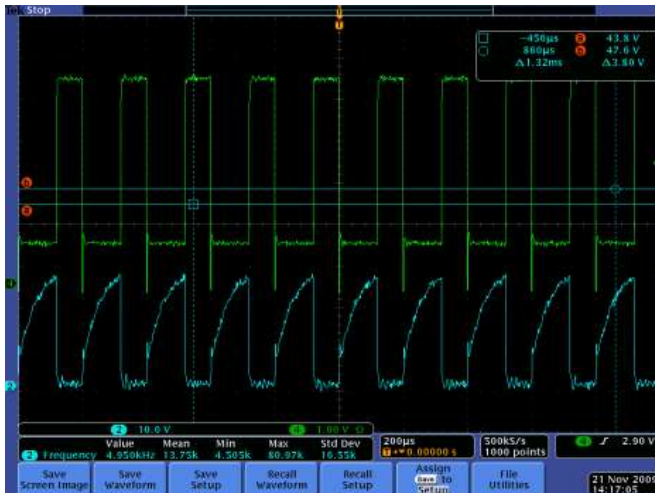


Figure 3: période de charge du condensateur

La seconde méthode utilise une porte temporelle, l'interrupteur est conducteur pendant un intervalle de temps défini par la commande sur la gâchette de l'interrupteur et reste bloqué quand le seuil de la commande passe par zéro et de nouveau le cycle recommence. La fréquence de charge est donc défini par la commande sur la gâchette. Pour illustrer cette fonction, la copie d'écran de l'oscilloscope montre sur la courbe verte la commande sur la gâchette de l'interrupteur et la courbe bleue montre la charge et décharge du condensateur.



L'avantage de cette méthode permet d'utiliser des interrupteurs très rapides telle que les IGBT dont le fonctionnement est expliqué dans la suite du rapport et cette méthode permet aussi de moduler plus facilement la fréquence pour reproduire un son.

Figure 4: Déclenchement de la décharge par la commande sur la gâchette de l'IGBT (interrupteur)

IV. Calcul théorique de la fréquence de commutation de l'interrupteur

Le calcul théorique présenté ci-dessous justifie la courbe de la figure 2 présentant la fréquence de commutation de l'interrupteur et la figure 34 reportée en annexe .

L'énergie nécessaire au plasma doit arriver en courtes impulsions constantes , c'est pourquoi on utilise un condensateur. On peut étudier la charge du condensateur pour connaître l'énergie transférée à l'arc à chaque impulsion. L'interrupteur est fermé en charge donc avec la loi des mailles,

$$\text{On a } E = Ri + U_c = RC \frac{dU_c}{dt} + U_c$$

On a alors $U_c(t) = E + ke^{-t/RC}$ mais $U_c(0) = 0$ donc $k = -E$

donc $U_c(t) = E(1 - e^{-t/RC})$ La charge est donc complète à $t = 5RC = 5 \times 500 \times 4 \times 10^{-9} = 10^{-5}$

On peut donc commuter jusqu'à 100kHz avec des charges constantes.

L'énergie du condensateur est donc $e = 1/2 c E^2 = 8,4 \times 10^{-5}$ J. On peut aussi étudier la décharge pour voir si elle affecte la fréquence. En utilisant la loi des mailles quand l'interrupteur est ouvert et en considérant le courant de la branche du générateur comme quasi nul grâce à la grande résistance, on a

$$U_c = Ul = L \frac{di}{dt} = LC \frac{d^2i}{dt^2}$$

$$\text{donc } U_c = k \cos(at + p)$$

$$\text{donc } U_c^2 + Ul^2 \text{ est constant donc } U_c = U_c(0) \cos(at + p) = E \cos(at + p)$$

$$\text{En dérivant deux fois on obtient } \cos(at + p) = LC a^2 \cos(at + p) \text{ donc } a = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

De plus $U_c(0)$ est un maximum donc on peut choisir $p = 0$

Ainsi ce courant devient négatif à $t = \pi \sqrt{LC}$

On peut considérer ce temps comme négligeable comparé à celui de l'interrupteur.

V. Résultats expérimentaux, formation de l'arc électrique

Nous avons choisi de vous présenter les principaux résultats expérimentaux que nous avons obtenu au cours de ce projet. Nous avons opté pour une démarche progressive qui nous a permis d'étudier le fonctionnement de ce circuit ainsi que les limitations des composants électriques utilisés. La commutation étant l'élément le plus sensible dans ce circuit nous avons organisé la présentation des résultats suivant le mode de commutation choisi. Les premiers interrupteurs choisis sont des commandes à seuil, au delà d'une tension définie, ils deviennent conducteurs et se bloquent au passage de la tension à zéro, la seconde catégorie est celle à commande par gâchette, elle nécessite comme on le verra une électronique plus complexe. Pour des raisons de clarté, les résultats obtenues avec les interrupteurs à seuil sont reportés en annexe, nous nous focaliserons sur les résultats obtenus avec les interrupteurs commandés par une gâchette, tel que l'IGBT dont les performances sont meilleures.

V.1 INTERRUPTEUR IGBT COMMANDE PAR LA GACHETTE

A) COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DE L'IGBT

Pour comprendre le fonctionnement de L'IGBT nous avons utilisé un circuit très simple, un générateur DC alimentant une résistance avec l'interrupteur entre la masse du générateur et une borne de la résistance.

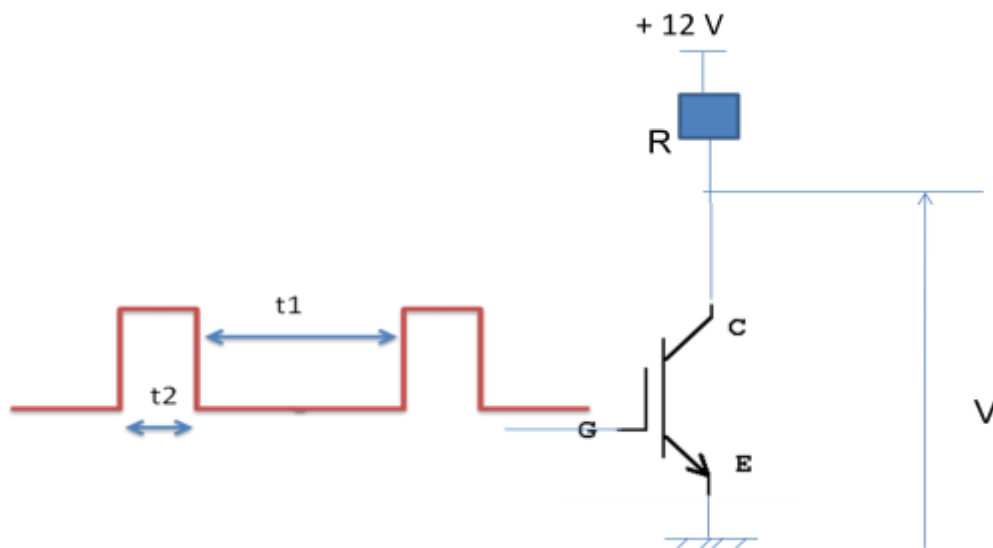


Figure 5 Circuit de compréhension de la commande de l'IGBT

La gâchette de l'IGBT est branché à un générateur d'impulsion, pendant l'instant t2 le signal est à une valeur de 12V et pendant l'intervalle t1 l'amplitude de l'impulsion est à zéro. Sur l'oscilloscope le signal V est à une valeur positive et il passe à zéro pendant le reste de l'intervalle t1. Nous avons donc sur ce

montage très simple commandé un IGBT pour le rendre conducteur sur un intervalle de temps contrôlé par le signal sur la gâchette.

B) CIRCUIT DE COMMANDE DE LA GACHETTE DE L'IGBT

Le composant IGBT est un interrupteur très performant il permet en effet de commander des circuits de puissance à des fréquences élevées. Par contre son utilisation dans notre circuit nécessite de commander la gâchette avec un signal de faible amplitude autour de 12 V et une fréquence ajustable.

Le circuit de commande utilise une horloge 555 pour générer le signal de commande de la gâchette. Nous nous sommes appuyés sur le document publié sur: "<http://www.williamson-labs.com/555-circuits.htm>" pour comprendre son utilisation et calculer les valeurs de résistance R_b , R_a pour obtenir en sortir de l'horloge 555 un signal de commande variable entre quelques centaines de Hz et 30 KHz.

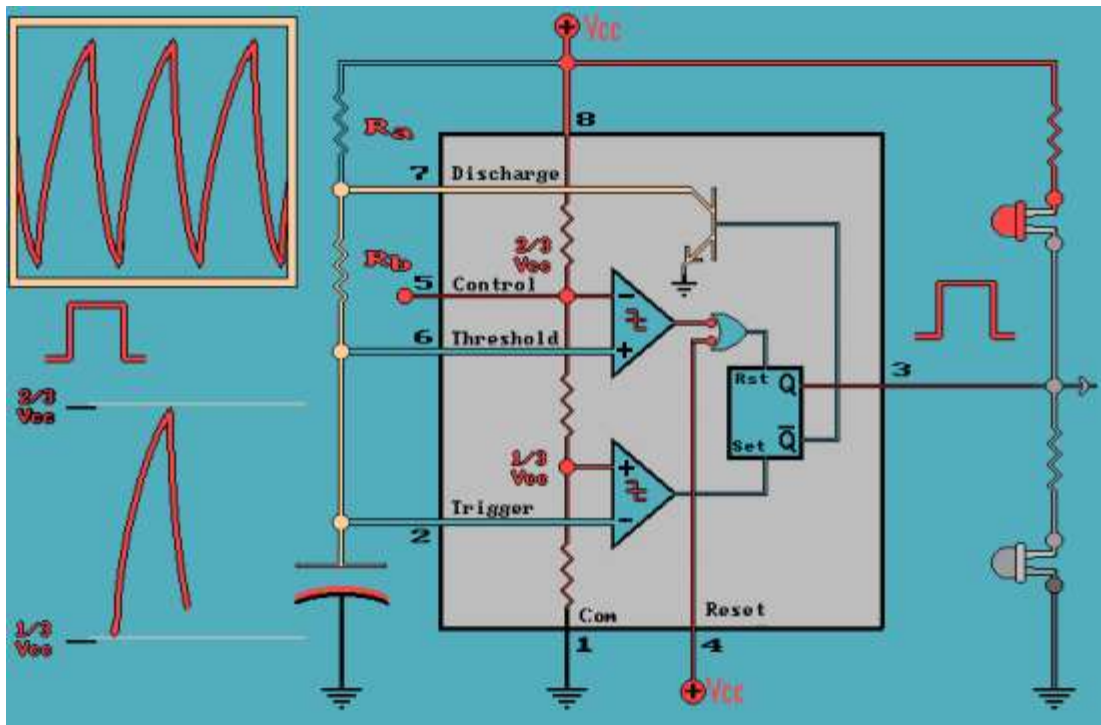
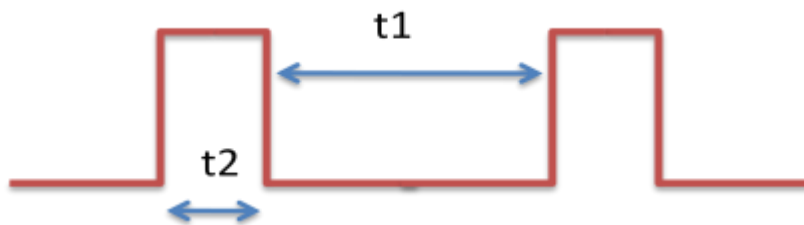


Figure 6 Circuit de l'horloge 555

Le signal de sortie sur la pin 3 commande la gâchette de l'IGBT, le sortie est de la forme suivante avec les paramètres temps t_1 et t_2 .



Pendant le temps t_2 la gâchette de l'IGBT reçoit une tension de 12 V positive et l'IGBT conduit le courant entre le collecteur et l'émetteur ensuite le signal de commande passe à zéro pendant l'intervalle de temps t_1 . Dans le circuit nous avons choisi de fixer t_2 fixe à 10 microsecondes et t_1 variable ajustable avec une résistance variable.

Les formules permettant de calculer t_1 et t_2 sont:

$$t_1 = 0.693 (R_a + R_b)C$$

$$t_2 = 0.693 (R_a)C$$

avec R_a et R_b les résistances du circuit du trimer, R_a entre la pin 8 et 7 et R_b pin 7 et 6, C est entre la pin 1 et 2.

Les calculs donnent pour une capacité de 10nF, une résistance R_b variable de 15KHz et une résistance R_a de 1500 Ohms.

Le schéma ci-dessous reprend le circuit de commande ci-dessous et l'intègre au circuit existant présenté sur la figure 1

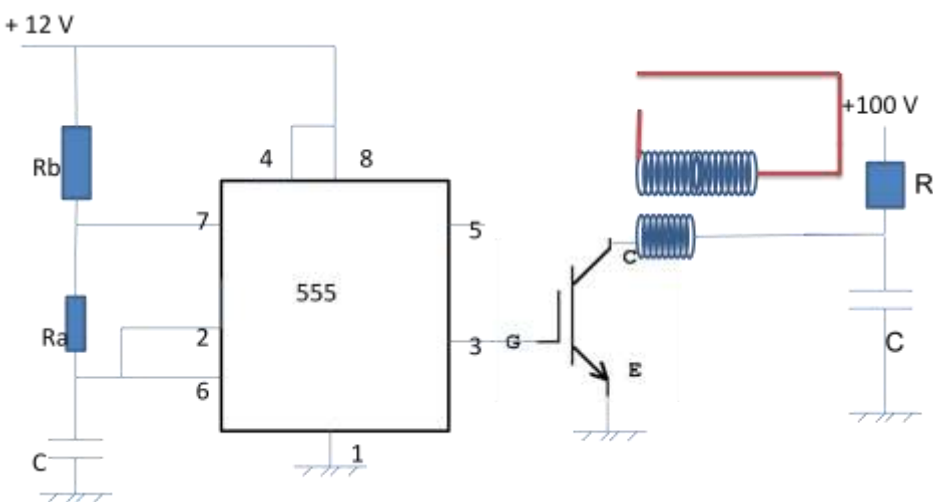
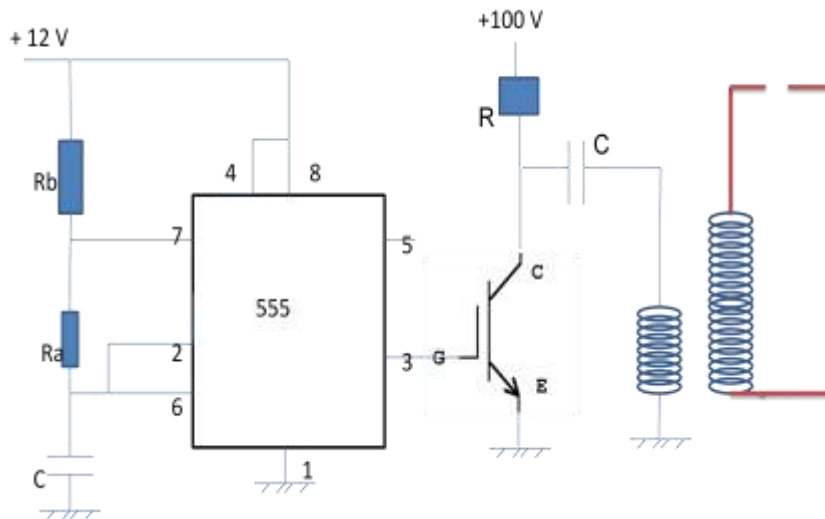


Figure 7 Circuit de commande et de puissance de l'arc électrique

Nous avons essayé aussi de mettre le transformateur entre la masse et la capacité (voir figure ci-dessous) mais ce montage engendre des oscillations sur la charge de la capacité et l'interrupteur IGBT est hors d'usage après quelques minutes d'utilisation.



Le composant 555 se présente sous la forme suivante , le point jaune indique la position de la pin 1.

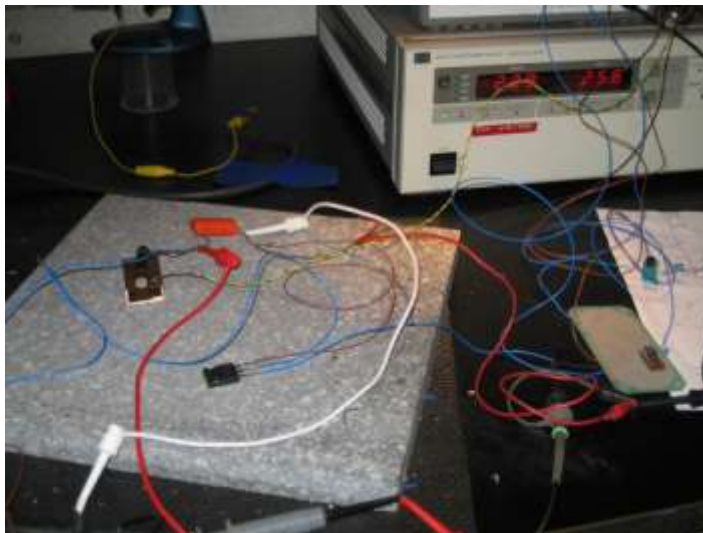
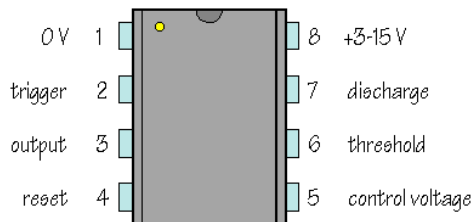


Figure 8 : Mise au point du circuit électrique avec la commande IGBT, utilisation d'un transformateur 12000 V maxi

C) MESURE DU SIGNAL DE COMMANDE DE LA GACHETTE, SORTIE 3 DU TIMER 555

Pour vérifier le bon fonctionnement de l'horloge 555, le signal 3 en sortie est mesuré sur l'oscilloscope, le circuit de commande est alimenté avec une alimentation DC +12 V.

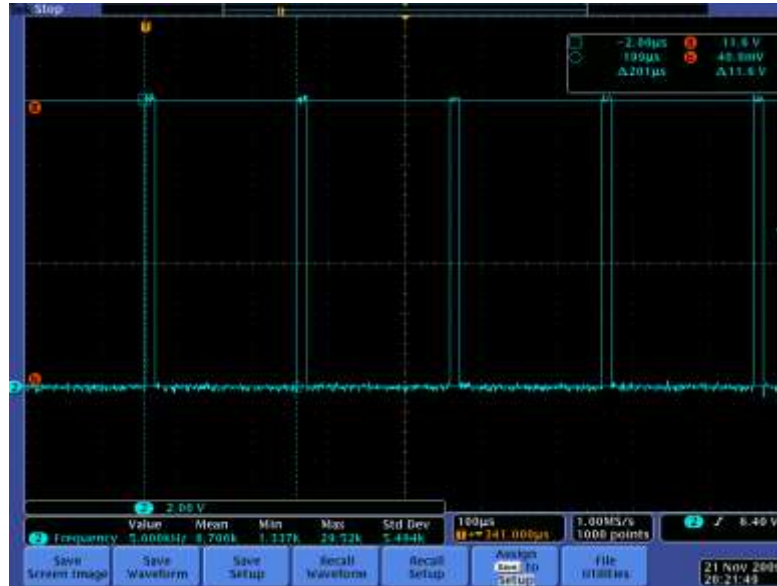


Figure 9 Signal de commande en sortie du timer (horloge)



Figure 10 Détail de la tension positive de la commande

la figure 16 montre des impulsions à une fréquence de 5KHz, avec le potentiomètre il est possible d'augmenter cette fréquence jusqu'à 33 KHz bien au delà de la plage d'utilisation de notre application.

La figure 11 montre le détail de l'impulsion qui permet à l'IGBT de fermer le circuit, la durée de l'impulsion est très brève.

D) GENERATION DE L'ARC ELECTRIQUE AVEC LA COMMANDE DE L'IGBT

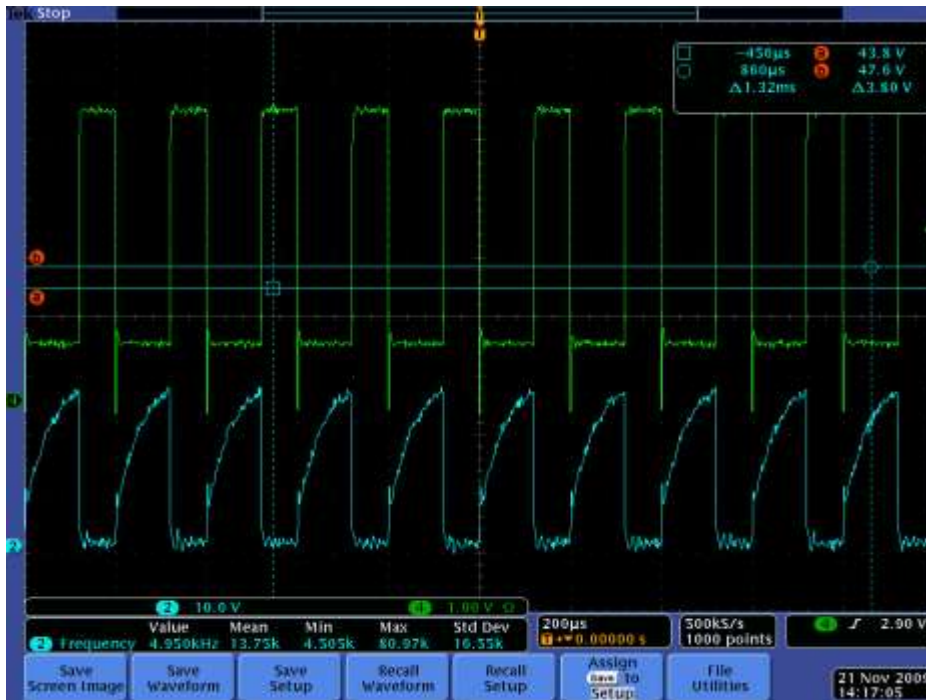


Figure 11 taux de répétition de la charge et décharge de la capacité

La figure 12 de couleur verte montre la courbe de commande de la gâchette et la couleur bleue la courbe de la mesure de la charge et décharge de la capacité. Au cours de l'impulsion positive, l'IGBT conduit le courant et la tension au borne de la capacité est nulle, et pendant l'intervalle de la tension d'impulsion égale à zéro le capacité se recharge car l'IGBT est en position bloqué (circuit ouvert). A basse fréquence le circuit consomme peu d'énergie, à une tension de 200 V, il consomme moins de 0.15 Ampères. Par contre à plus haute fréquence, le circuit consomme d'avantage jusqu'à 0.5 A, d'ailleurs la résistance de 500 Ohms devient rouge et a fallu la monter sur un pièce métallique pour qu'elle dissipe sa chaleur. De même l'interrupteur IGBT dissipe de la chaleur, et il fallu le monter également sur un dissipateur thermique. Nous avons consommé plus de 5 IGBT avant de faire fonctionner le circuit.

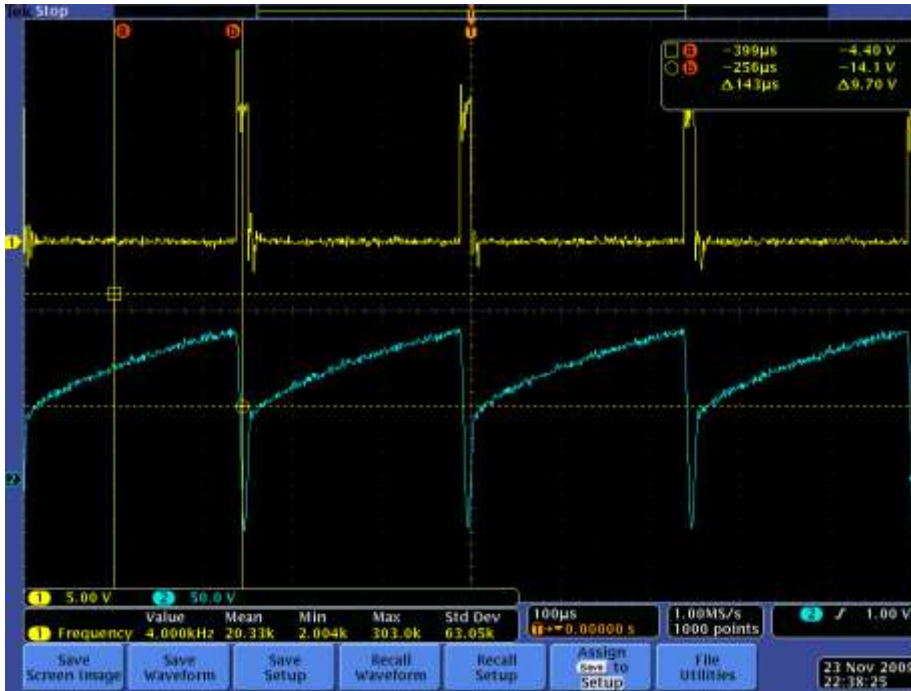


Figure 12 : Fréquence d'oscillation de la charge à 4kHz

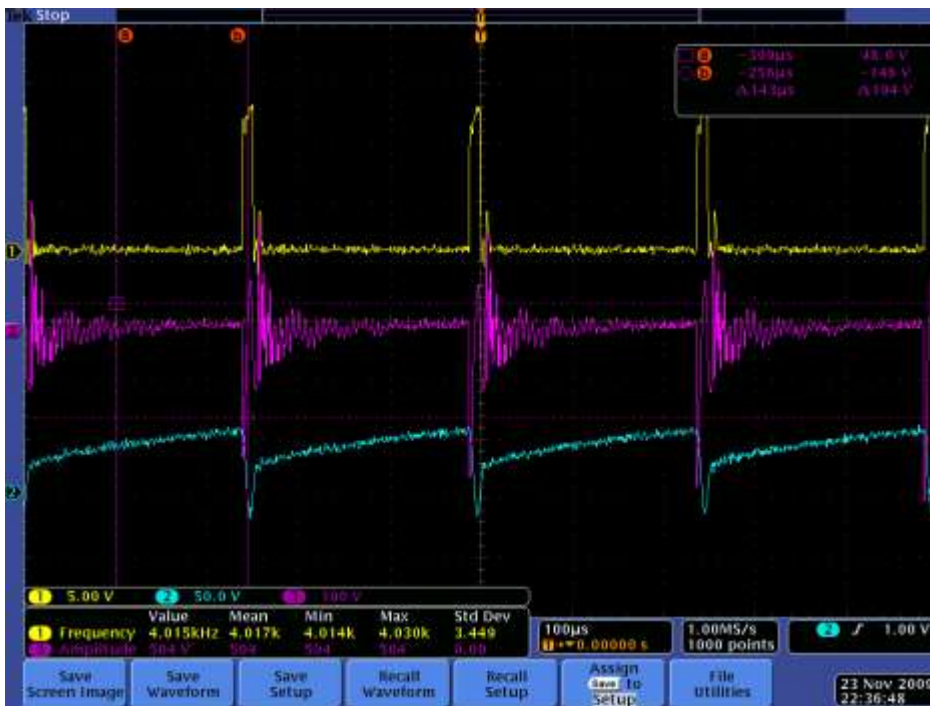


Figure 13: tension au borne de la capacité (bleue) et au borne du primaire transformateur rouge

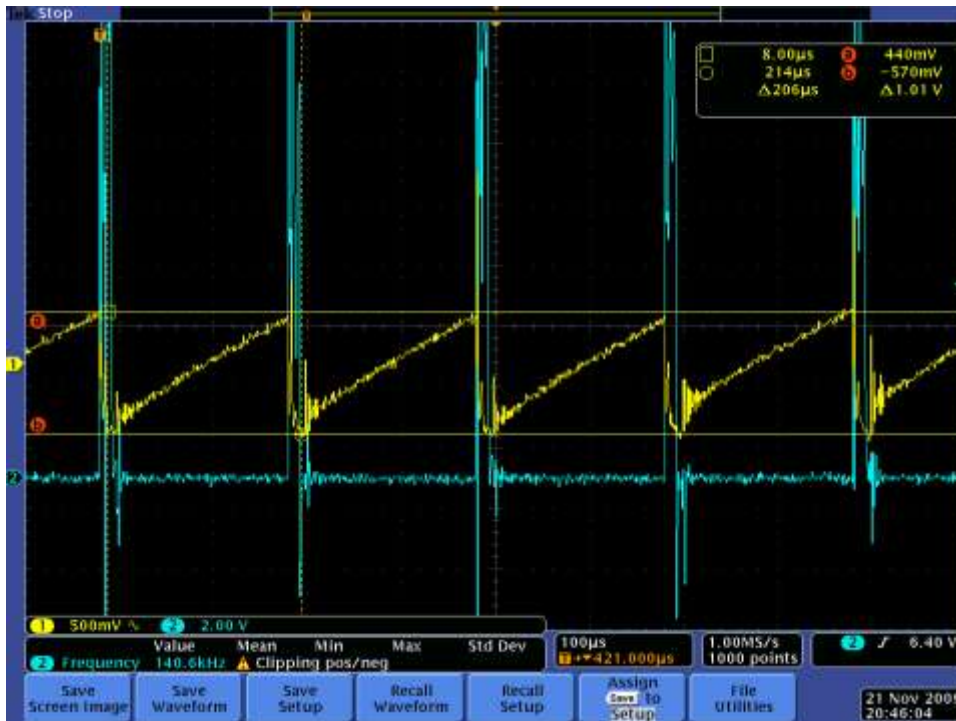


Figure 14: Fréquence d'oscillation à 5KHz, période de 206 microsecondes, (courbe jaune, l'amplitude du signal est x 100 soit $1.01 \times 100 = 101V$)

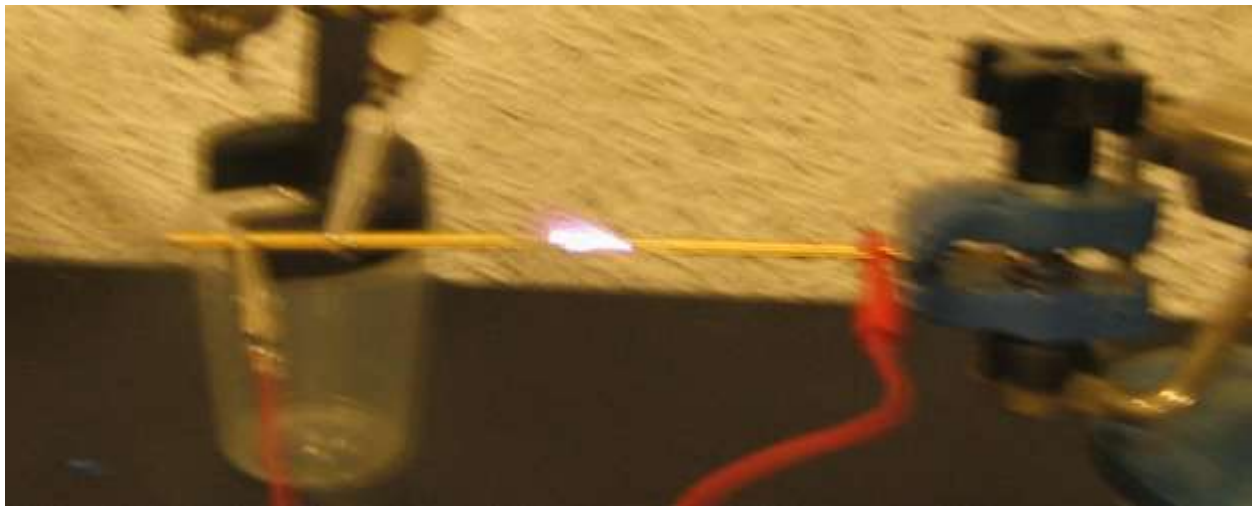


Figure 15: Formation de l'arc avec des électrodes en laiton, interrupteur IGBT

VI. Haut parleur à plasma

La mise au point des circuits a nécessité beaucoup de temps et nous avons ajouté des dissipateurs d'énergie, une pièce métallique sur la résistance et un dissipateur d'énergie sur l'interrupteur pour faire fonctionner le circuit pendant un temps raisonnable. A ce stade du projet nous avons voulu refaire l'expérience de William Duddell en utilisant les électrodes comme un haut parleur.

VI-1 Modulation en fréquence du son en utilisant l'horloge 555

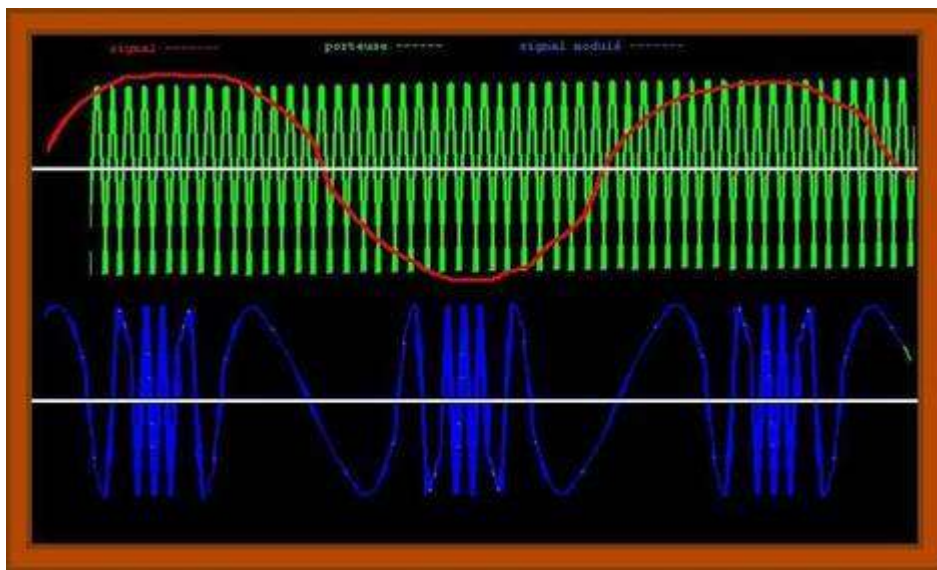


Figure 16 Modulation en fréquence d'un signal analogique

La modulation en fréquence consiste à moduler un signal par une fréquence porteuse de fréquence plus élevée. Cette modulation est illustrée sur la figure ci-dessus, la modulation de fréquence consiste à porter l'information par une modification de la fréquence de la porteuse. Cette technique convient à la restitution du son par un haut parleur à plasma. En effet le circuit de charge et de décharge de la capacité à travers un transformateur ne permet que de générer un arc électrique pendant une durée brève. La restitution du son est faite en contrôlant la fréquence des impulsions. Pour des raisons pratiques nous avons utilisé l'entrée 5 de l'horloge 555 qui permet dans une plage limitée en tension de

faire faire varier la fréquence des impulsions en fonction du signal audio. Cette technique a permis de restituer en partie le son audio avec un bruit de fond persistant à la fréquence porteuse.

En s'appuyant sur le document page 6 du fonctionnement de l'horloge 555 (www.national.com) LMC555 CMOS Timer, il est possible de moduler la fréquence des impulsions en sortie de l'horloge en envoyant un signal sur l'entrée 5 de l'horloge. La tension maximale que peut supporter l'horloge est de 12 V maxi, donc le signal d'entrée sur la pin 5 doit rester dans la plage 0 - 12V (dans la pratique 4 V maxi). Pour protéger le circuit des tensions continues une capacité de 100nF est mise sur la pin 5, ainsi seules les tensions alternatives sont transmises à l'horloge 555.

Le circuit utilisé est équivalent à celui de la figure 1, un signal audio amplifié en sortie d'un lecteur de CD est envoyé à l'entrée 5 de l'horloge 555. Le premier résultat avec ce deuxième circuit est aussi impressionnant, en effet la fréquence des impulsions de commande de la gâchette est modulée, (Vidéo pour supporter ce résultat). L'arc électrique vibre et on distingue quelques notes de musique. Nous avons fait varier la fréquence de la formation de l'arc en ajustant la résistance R_b variable, nous distinguons plus de notes qu'on la fréquence de commutation de l'interrupteur est élevée. A ce stade il faudrait ajuster l'amplitude du signal audio pour que la variation de la fréquence de commutation soit dans la gamme des sons de la musique que l'on veut reproduire.

Réglage des paramètres du circuit pour obtenir un son audible

Nous avons remarqué par l'expérience qu'en ajustant certains paramètres du circuit, la qualité du son émis par l'arc s'améliore considérablement. Ces paramètres sont:

- ✓ Nature des électrodes et distance entre électrodes, en effet la nature des électrodes change la sonorité de l'arc. Nous avons essayé des électrodes en cuivre, en laiton et en tungstène. Le cuivre et le laiton s'oxyde assez rapidement et l'arc électrique est moins régulier. Le tungstène donne les meilleurs résultats en terme de régularité de l'arc électrique.
- ✓ Distance entre électrodes, l'amorçage de l'arc se fait toujours plus facilement avec une distance faible de l'ordre de 5 mm, par contre le niveau du son émis pour cette distance est faible. En augmentant la distance jusqu'à 20 mm l'arc est plus vif, mais il faut quelque fois l'amorcer avec une flamme. Le niveau sonore émis est nettement plus important avec une distance entre électrodes plus élevée.
- ✓ Amplitude du signal audio sur l'entrée 5 de l'horloge 555, ce signal a pour but de moduler les impulsions envoyées à la gâchette de l'IGBT, les meilleurs résultats sont obtenus en amplifiant le signal audio jusqu'à une valeur de 6 V crête à crête.
- ✓ Fréquence de commutation de l'IGBT, cette fréquence est très importante, elle est contrôlée grâce au potentiomètre. A basse fréquence le son est presque inaudible et s'améliore considérablement avec la fréquence. A basse fréquence autour de 1.5 kHz le

circuit consomme 0.15 sous 200V, à haute fréquence , 10KHz, il consomme davantage autour 0.4 A sous 200V.

En ajustant les paramètres cités ci-dessous le son émis par l'arc est compréhensible et nous comprenons les paroles de la chanson. Cependant à cette fréquence, l'arc émet un son aigu qui interfère avec le son que l'on souhaite reproduire. Il faut pour cela que l'arc électrique soit formé à une fréquence en dehors du son audible (supérieure à 20 KHz).

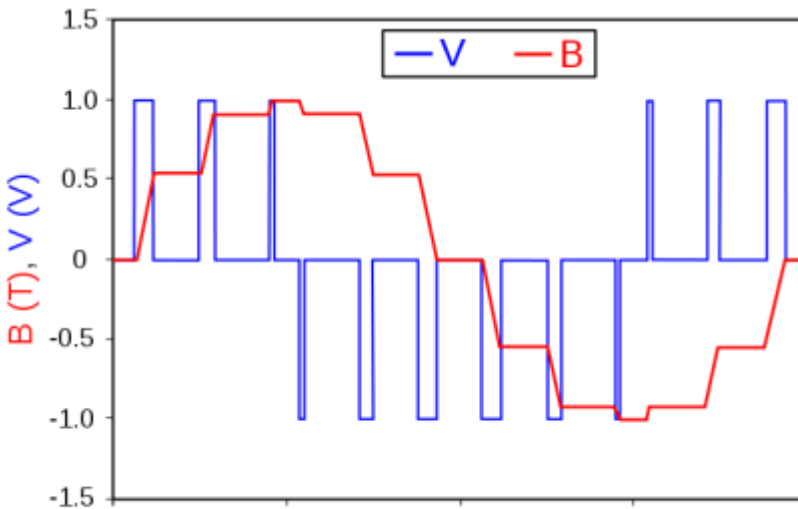
VI-2 Modulation Delta Sigma du signal audio

Pour améliorer la qualité du son du haut parleur à plasma, en utilisant le même circuit de puissance, un circuit de commande de modulation de fréquence plus élaboré devrait permettre de générer un signal de commande plus fidèle au contenu de l'information du signal audio. Nous avons opté pour une autre forme de modulation, la modulation delta-Sigma permettant de générer une série d'impulsions numériques dont l'intervalle des impulsions reproduit le rythme du signal audio.

Cette modulation nous a paru intéressante car d'une part elle devrait permettre de reproduire le son audio plus fidèlement qu'avec la modulation en fréquence de l'horloge 555 et d'autre part d'un point de vue pédagogique, cette technique nous permet d'aborder la conversion des signaux analogiques en signaux numériques à travers ce circuit de commande.

A) MODULATION DELTA SIGMA

La modulation Delta Sigma est à rapprocher de la modulation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse width modulation). Cette technique permet de discrétiser un signal continu en une série de signaux discret qui permet de faire fonctionner un circuit en tout ou rien, comme le circuit de puissance dont l'interrupteur est soit ouvert ou fermé.



0 Figure 17 Principe de la modulation en amplitude (PWM: Pulse Width modulation)

En effet le signal en rouge est discrétisé par une série d'impulsions de largeur variable dont le signe des impulsions est donné par la pente de la courbe.

Par nature la formation d'un arc électrique ne permet pas d'utiliser des impulsions négatives contrairement à un haut parleur électromécanique qui oscillent sous l'effet d'un signal électrique de signe positif ou négatif. Par conséquent la modulation Delta Sigma dont le principe est comparable à la modulation PWM est mieux adapté à la formation d'un arc électrique car elle génère une série d'impulsions de même signe dont l'intervalle entre les impulsions représente l'information contenue dans le signal audio.

Le modulateur Delta-Sigma convertit le signal analogique en une suite continue de 0 et 1 à une cadence déterminée par la fréquence d'une horloge. La sortie de ce convertisseur dit de 1 bit est commandé par un comparateur dont une entrée est le signal audio et la seconde est le signal filtré en sortie du convertisseur (boucle de réaction négative), dont la tension représente la valeur moyenne du signal en sortie du convertisseur.

Le circuit comprend :

- un comparateur dont une entrée est le signal audio,
- une horloge qui permet d'échantillonner le signal à une fréquence élevée, la littérature conseille une fréquence 10 supérieure à la fréquence du signal à moduler
- un flip flop permettant de transformer les signaux analogiques en signaux numériques, sortie 0 ou 1 numérique
- un filtre passe bas
- Des operateurs logiques NAND (fonction et-non)

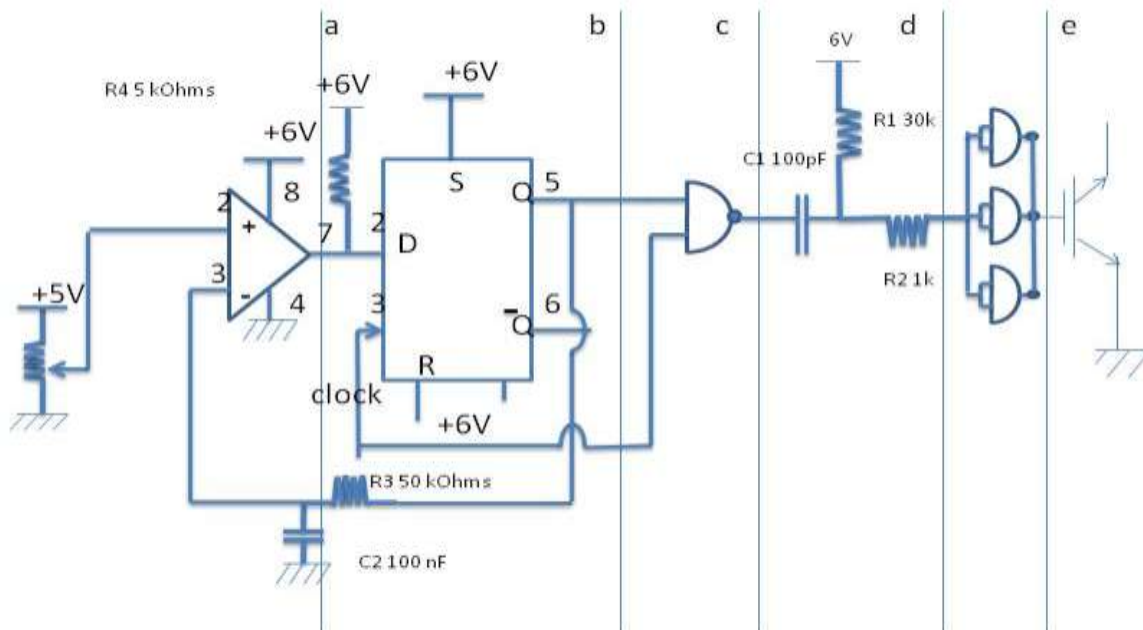


Figure 18 Circuit de Modulation Delta Sigma, entrée 2 du comparateur est une résistance de test

Le schéma ci-dessous permet de générer des impulsions numériques dont l'intervalle entre les impulsions dépend de la valeur d'entrée du signal analogique en entrée 2 du comparateur. Le signal analogique est testé avec une résistance variable permettant de faire varier la tension de 0-6V. Dans le circuit final cette résistance est remplacée par le signal audio, voir figure(41).

B) REPRESENTATION DES SIGNAUX ELECTRIQUES DANS LE CIRCUIT

Les figures ci-dessous permettent de décrire le fonctionnement du circuit. La modélisation mathématique de ce circuit étant complexe, nous nous bornerons à commenter les signaux mesurés à l'oscilloscope. A la sortie Q du flip-flop, un operateur logique NAND a été ajouté permettant de limiter la largeur des impulsions numériques à un nombre entier de période de l'horloge. Le Filtre R1 C1 permet de définir la largeur des impulsions définit par la constante de temps $R1C1$ et les trois NAND en parallèles sont utilisés pour rendre le signal positif, lui donner une forme plus carré et servent également de driver pour commander l'interrupteur.

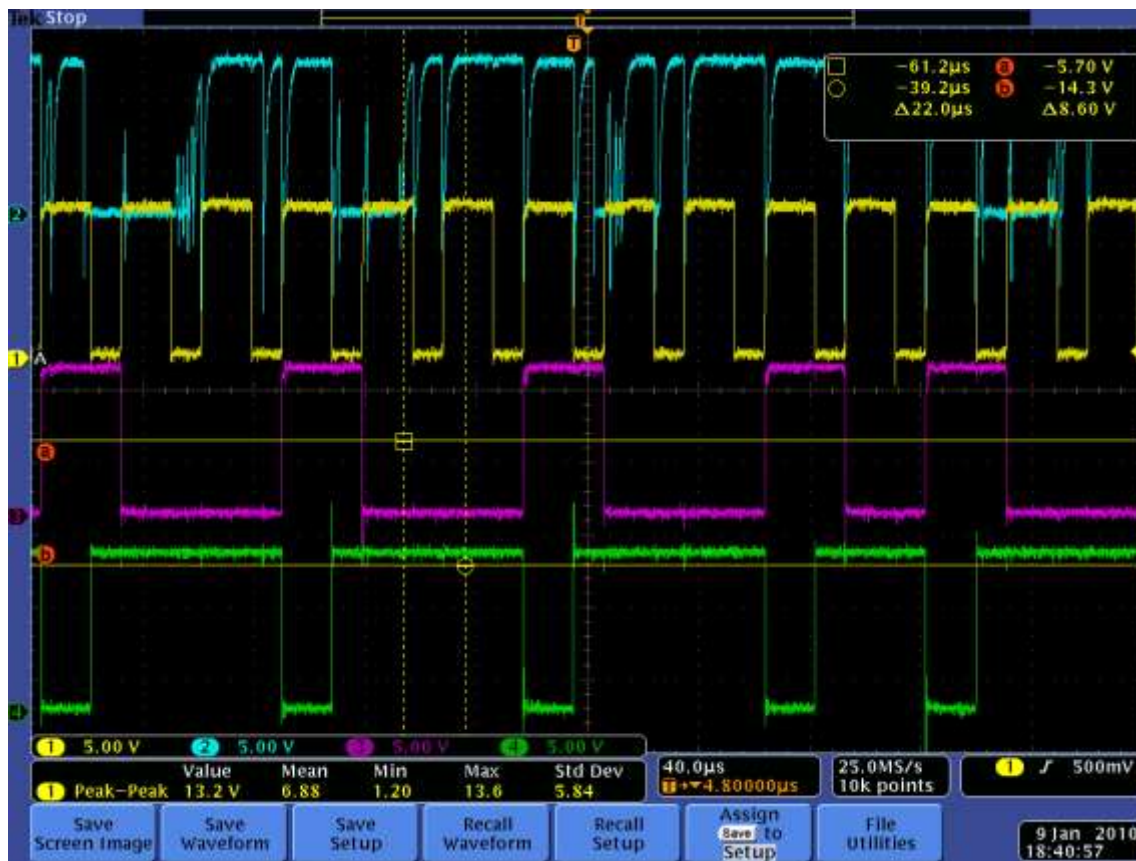


Figure 19: Signal mesuré à l'oscilloscope au point a, 3, b et c

La courbe bleue est mesurée à la sortie du comparateur, qui compare la valeur d'entrée du signal ici dans l'expérience, la valeur entre 0-6V de la résistance variable, avec la valeur du signal filtré par un filtre passe bas en sortie du flip-flop qui représente une valeur moyenne de ce signal de sortie.

La courbe jaune représente le signal de l'horloge, signal haute fréquence de 30KHz en entrée 3 du flip-flop. Le front montant du signal carré de l'horloge permet de déterminer la valeur 0 ou 1 en sortie Q (5).

Le signal en sortie du flip flop est une succession de 0 et de 1 dont la distribution varie à la cadence de la fréquence de l'horloge et en fonction de la sortie du comparateur. La courbe verte représente le signal en sortie du premier NAND, l'entrée étant la courbe jaune et rouge, la valeur 1 respective de chaque courbe donne 0 et toutes les autres combinaisons donnent 1 ce qui se traduit par établir une période à la sortie du NAND égale à un nombre entier de front montant du signal de l'horloge.

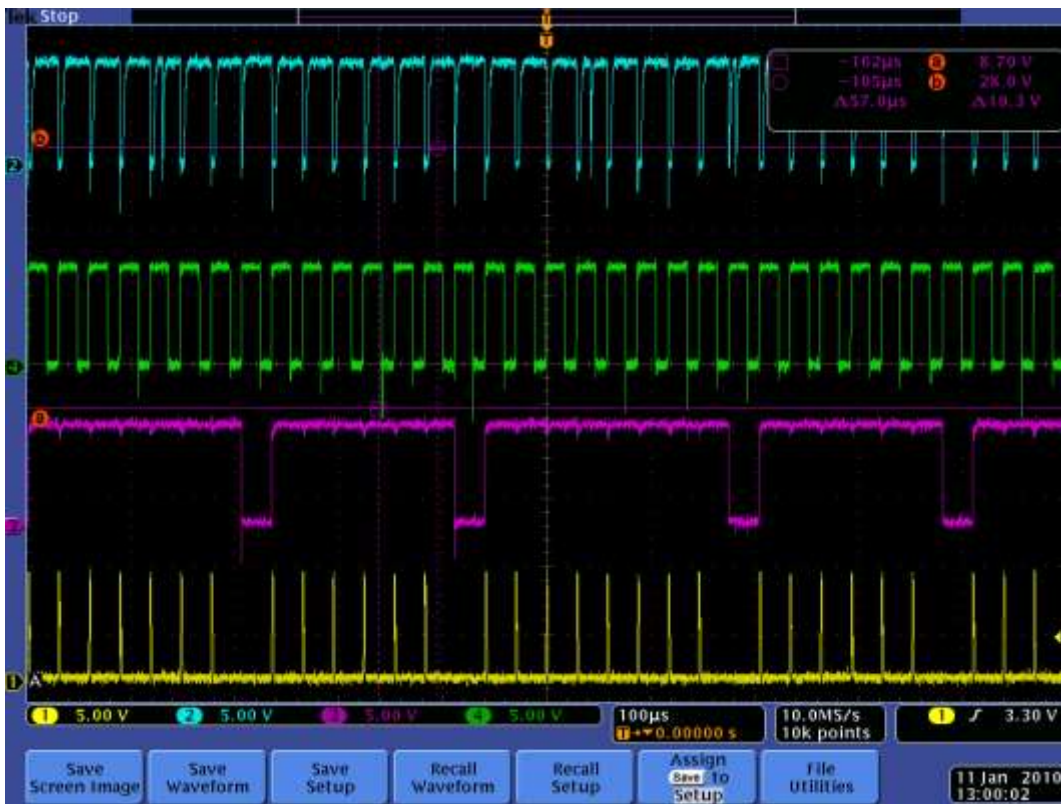


Figure 20 Signal mesuré à l'oscilloscope au point a,3, b et e

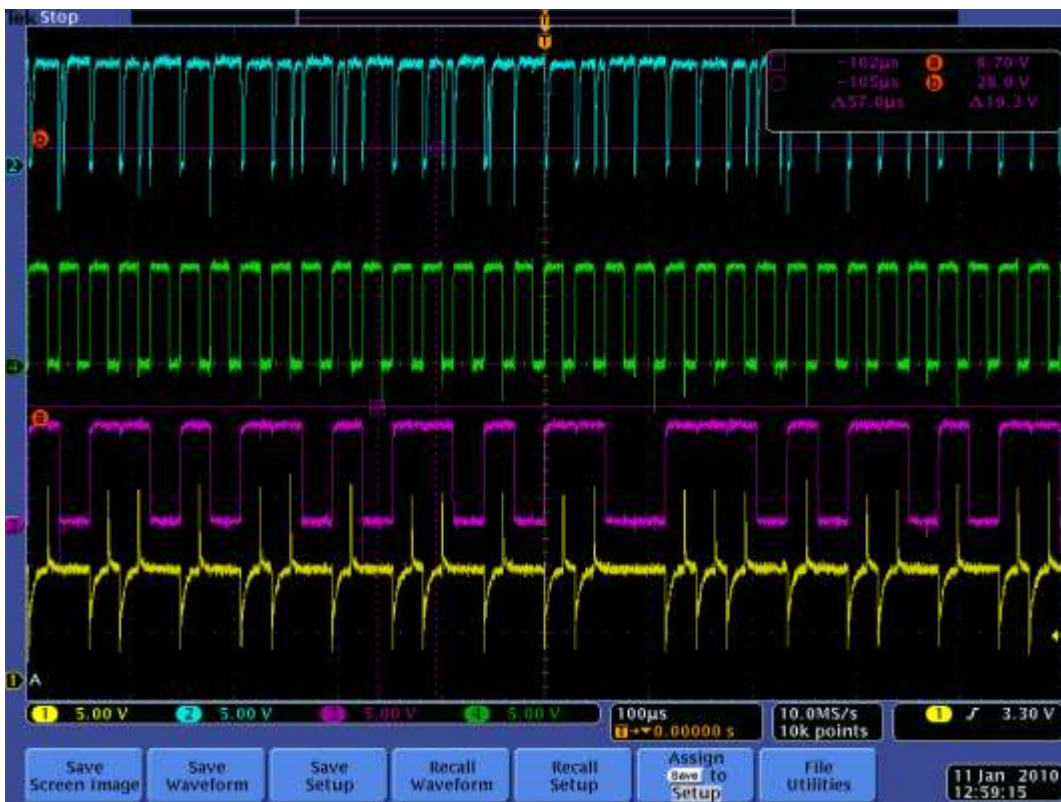


Figure 21 : Signal mesuré à l'oscilloscope au point a ,3 , b et d

La figure 21 et 22 montrent les signaux électriques mesurés après le filtre R1C1 dont la fonction est de définir la durée de l'impulsion de commande de l'interrupteur en position fermée, courbe jaune sur la figure 22. Les 3 NAND montés en parallèles permettent de rendre positif le signal en sortie du filtre et de le rendre carré pour commander l'interrupteur, figure (23).



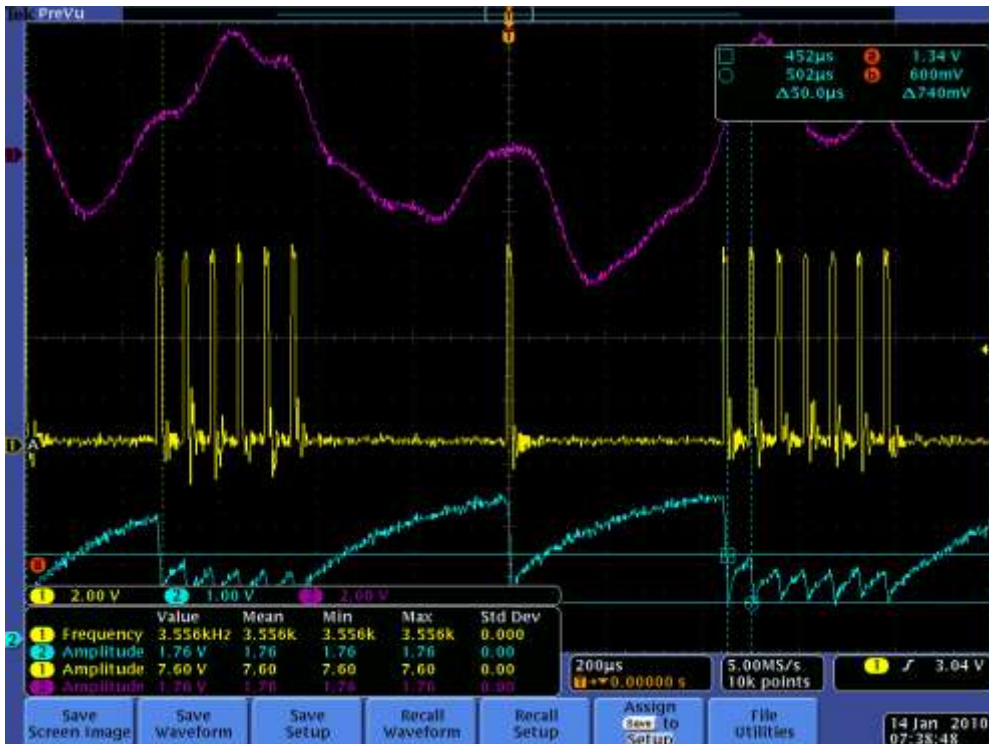
Figure 22 : sortie de commande de l'interrupteur en sortie des 3 NAND

La valeur de la résistance R1 et la valeur de la capacité C1 a été déterminée par essais successifs, après plusieurs tests , la valeur R1C1 = 10uS permet de commander l'interrupteur et fournit un signal en sortie des 3 NAND de forme carré.

B) MODULATION DU SIGNAL AUDIO



Figure 23 Signaux mesurés avec en entrée du comparateur le signal audio



26

Figure 24 Grossissement de la figure 24

Les figures 24 et 25 montre le signal audio, (courbe rouge) et la commande de l'interrupteur est représentée par la courbe jaune, la modulation Delta Sigma du signal audio dans cette application se traduit par une succession d'impulsions de largeur équivalente dont l'intervalle entre les impulsions représente l'information contenue dans le signal audio. La courbe bleue représente la tension aux bornes de la capacité dans le circuit de puissance, pendant des intervalles de temps longs, la capacité se recharge à une tension définie par l'alimentation, par contre aux intervalles de temps plus petits, la tension de charge est limitée par l'intervalle entre les impulsions. Une constante de temps RC plus faible permettrait d'atteindre des tensions plus importantes aux intervalles plus petits.

C) FONCTIONNEMENT DU HAUT PARLEUR A PLASMA



Figure 25 : Formation du Plasma

La figure 26 est une des illustrations de la formation de l'arc électrique avec la modulation Delta Sigma. L'arc électrique est formé à une fréquence d'horloge élevée autour de 30 kHz. Le circuit de puissance et le circuit de commande ont été installés sur deux cartes électriques afin de limiter les interférences entre les signaux.

En mode de fonctionnement sans entrée audio, l'arc électrique est régulier, mais il faut éviter de créer des mouvements d'air autour de l'arc électrique, car alors il devient moins uniforme et il faut attendre que les perturbations d'air diminuent pour rétablir un arc électrique uniforme.

Avec un signal audio, le son créé par le plasma est audible et on comprend distinctement les paroles ainsi que la musique. Toutefois, le niveau du son est faible, et un bruit de fond haute fréquence se superpose au son audio. Il est nécessaire d'écarter les électrodes à une distance d'environ 20 mm pour augmenter le niveau sonore.

VII. Conclusion

Que de chemin parcouru après la lecture du principe du haut parleur que nous avons découvert dans le livre de physique, référence 1. Nous avons réussi à produire un son audible dont la qualité a été améliorée en utilisant une modulation Delta Sigma. Mais ce que l'on retiendra davantage ce sont les étapes qu'il a fallu franchir pour arriver à ce résultat. La théorie de la charge et décharge d'un condensateur dans un transformateur est relativement simple à comprendre, du moins nous pouvons écrire les équations pour déterminer les tensions électriques dans le circuit. Par contre la réalisation pratique d'un tel circuit se heurte à des problèmes de technologie à savoir commuter la charge et décharge de la capacité à une fréquence élevée. Le circuit électrique génère une tension élevée pour former un arc électrique, il faut d'une part prendre des précautions pour ne pas s'électrocuter mais également veuille à protéger les éléments du circuits. La résistance de charge de la capacité avec l'interrupteur sont les deux éléments qui dissipent de l'énergie par effet joule. Il a fallu monter la résistance sur une pièce de métal pour dissiper son énergie. De même l'interrupteur IGBT a du être monté sur un dissipateur de chaleur.

La commutation simple à l'aide d'un tube à gaz a permis de nous focaliser sur les premiers éléments du circuits pour former un arc électrique, il a fallu choisir une capacité suffisante pour créer un arc électrique et un logiciel écrit sur Excel a permis de confronter les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux en particulier la fréquence de charge et de décharge de la capacité. Nous avons ensuite amélioré la fréquence de commutation du circuit en essayant des interrupteurs plus sophistiqués, bien que les composants utilisés sont des semi-conducteurs dont la fonctionnement est complexe, leur utilisation est compréhensible. Nous avons ensuite compris qu'en changeant la fréquence de commutation de l'interrupteur, le son produit par l'arc électrique varie et valide ainsi le principe du haut parleur à plasma.

Notre compréhension de la physique pour générer un son a évolué au cours de l'expérience. S'il est vrai qu'intuitivement on comprend que la commutation de l'interrupteur doit se faire à une gamme de fréquence large, basse fréquence jusqu'à des fréquences élevées pour reproduire les caractéristiques du son, (notre oreille est sensible entre 100Hz et 15 KHz), la fréquence de la génération de l'arc doit idéalement se faire dans une fréquence inaudible au delà de 20 KHz, pour ne pas entendre le sifflement de l'arc.

Le circuit de commande a permis d'utiliser une entrée de l'horloge 555 pour moduler en fréquence le signal audio et malgré les limitations de ce composant, nous avons réussi à reproduire un son audible. Nous avons ensuite amélioré nettement la qualité du son en implémentant une modulation Delta Sigma du signal audio que nous avons adapté à la formation d'un arc électrique. La qualité du son est nettement supérieure au son produit par la modulation en fréquence avec l'horloge 555. Le son peut être encore amélioré en injectant de l'hélium afin de pouvoir augmenter la distance entre les électrodes.

Références:

reference: p 587 du livre College Physics for College students by Henry S. Carhart, Sc.D., LL.D.
ci-dessous extrait du livre:

655. The Singing Arc.— When a condenser and an impedance coil are connected in series around an electric arc supplied with direct current, the arc itself may be thrown into a state of vibration with a frequency depending on the period of the shunt circuit (Fig. 425). Small currents of 1 to 3 amperes give the best results.

Sudden changes occur in the resistance of the arc, and these change the potential difference between the carbons available for charging the condenser.

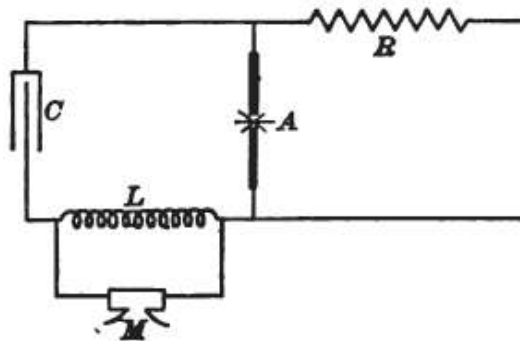


Fig. 425

Liste des Figures

Figure 1: circuit électrique permettant de générer un arc électrique.....	6
Figure 2 : Paramètres définissant la période de décharge du condensateur.....	7
Figure 3: période de charge du condensateur.....	8
Figure 4: Déclenchement de la décharge par la commande sur la gâchette de l'IGBT (interrupteur).....	8
Figure 5 Circuit de compréhension de la commande de l'IGBT.....	10
Figure 6 Circuit de l'horloge 555.....	11
Figure 7 Circuit de commande et de puissance de l'arc électrique	12
Figure 8 : Mise au point du circuit électrique avec la commande IGBT, utilisation d'un transformateur 12000 V maxi.....	13
Figure 10 Signal de commande en sortie du timer (horloge)	14
Figure 11 Détail de la tension positive de la commande	14
Figure 12 taux de répétition de la charge et décharge de la capacité.....	15
Figure 13 : Fréquence d'oscillation de la charge à 4kHz	16
Figure 14: tension au borne de la capacité (bleue) et au borne du primaire transformateur rouge.....	16
Figure 15: Fréquence d'oscillation à 5KHz, période de 206 microsecondes, (courbe jaune, l'amplitude du signal est x 100 soit $1.01 \times 100 = 101V$)	17
Figure 16: Formation de l'arc avec des électrodes en laiton, interrupteur IGBT.....	17
Figure 17 Modulation en fréquence d'un signal analogique	18
Figure 18 Principe de la modulation en amplitude (PWM: Pulse Width modulation)	20
Figure 19 Circuit de Modulation Delta Sigma, entrée 2 du comparateur est une résistance de test	22
Figure 20: Signal mesuré à l'oscilloscope au point a, 3, b et c.....	23
Figure 21 Signal mesuré à l'oscilloscope au point a,3, b et e.....	24
Figure 22 : Signal mesuré à l'oscilloscope au point a ,3 , b et d.....	24
Figure 23 : sortie de commande de l'interrupteur en sortie des 3 NAND.....	25

Figure 24 Signaux mesurés avec en entrée du comparateur le signal audio	26
Figure 25 Grossissement de la figure 24.....	26
Figure 26 : Formation du Plasma	27
Figure 27: Transformateur électrique.....	33
Figure 28 : Symbole du transformateur électrique	34
Figure 29 : tube à décharge à gaz	35
Figure 30 : Sidac et Symbole du Sidac.....	35
Figure 31 : Symbole de L'IGBT.....	37
Figure 32: circuit électrique permettant de faire varier la période de charge du condensateur.....	38
Figure 33: Décharge de la capacité à l'aide du tube à gaz, les tensions sont à multipliés par 100, (sonde diviseur par 100)	40
Figure 34: tension du borne du primaire, (tension x 100).	40
Figure 35 Arc électrique formé à 2KHz	41
Figure 36: commande avec Thyristor, déclenchement à seuil	42
Figure 37 Arc formé à 5KHz, électrodes en cuivre	43
Figure 38: arc formé avec des électrodes en tungstène.....	43
Figure 39: Circuit électrique avec la commande Thyristor, utilisation d'un transformateur 7000V maxi en sortie	44
Figure 40 : Etape de démontage et de remontage du primaire du transformateur	45
Figure 41: Modulation Delta Sigma du signal audio	45

Annexes

VIII. Description des éléments du circuit

VIII.1 Le générateur, Les dipôles électriques et le transformateur

Le générateur délivre un courant continu au borne du circuit, la tension maximum délivré par le générateur est de 300 V, sous un 1 ampère, soit une puissance maximale de 300W.

- la Resistance est l'élément dissipatif dans le circuit, il est utilisé dans le circuit pour limiter le courant et il définit la constante de temps de la charge de la capacité. La tension au borne de la résistance est:

$$U_r(t) = R.I$$

- La capacité est l'élément qui stocke l'énergie pour ensuite le restituer, il est défini par la loi:

$$U_c(t) = \int \frac{1}{c} i(t) dt$$

-Transformateur est l'élément qui élève la tension fournie par la capacité et la transforme dans le rapport du nombre de tour du secondaire sur le primaire.

Le transformateur électrique en général se compose d'un matériau ferromagnétique sur lequel sont bobinés deux enroulements, l'un est appelé primaire et l'autre secondaire.

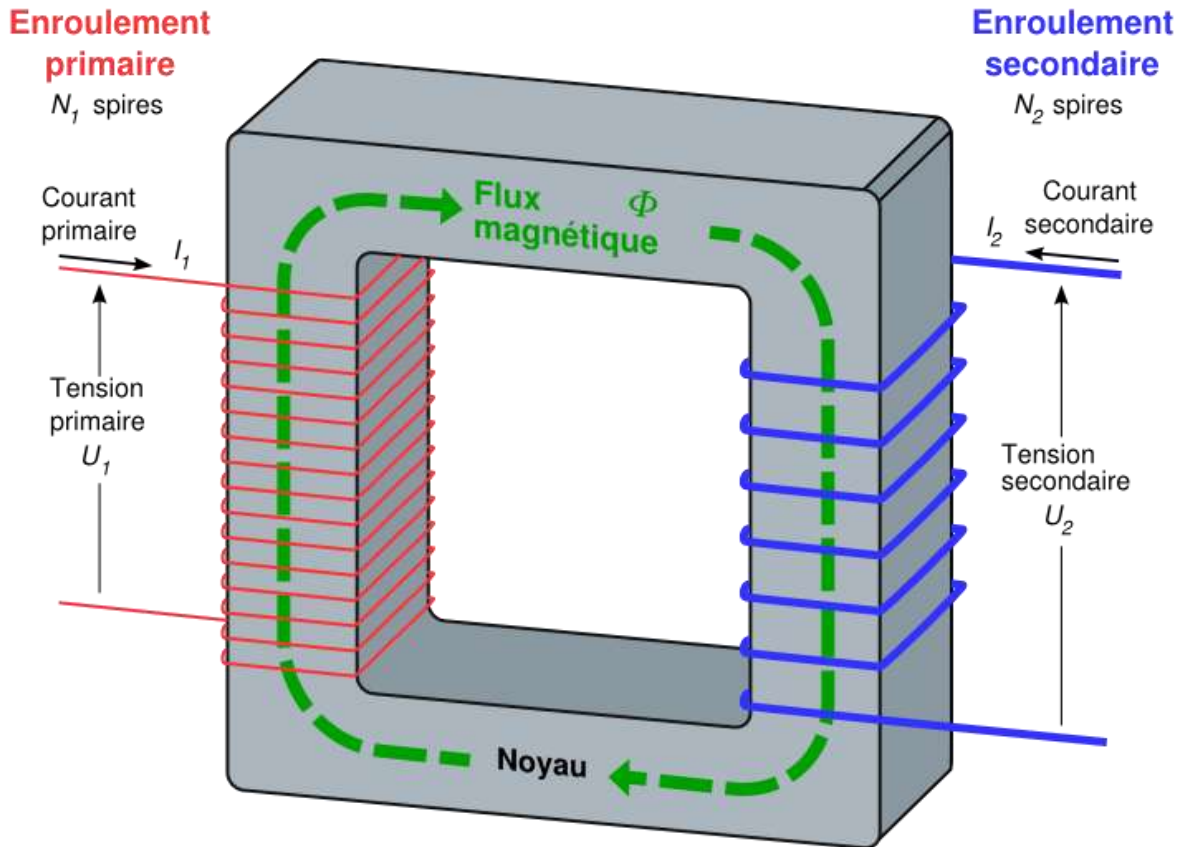


Figure 26: Transformateur électrique

Au borne du circuit primaire une tension alternative est appliqué qui fait passer un courant alternatif dans l'enroulement. En se référant à l'effet du courant électrique circulant dans une bobine, un champ magnétique est induit dans la bobine, et ce champ magnétique est canalisé par le noyau et circule dans le second enroulement. Ce champ magnétique induit alors un courant dans l'enroulement secondaire et une tension au borne de l'enroulement.

Le rapport des tensions entre le primaire et le secondaire est donné par le rapport du nombre de tours de chaque enroulement.

Ainsi:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

comme la puissance est conservée donc : $U_1 I_1 = U_2 I_2$

et le rapport du curent primaire sur le secondaire est donné par la relation :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

La modélisation d'un transformateur parfait est représenté par le schéma suivant:

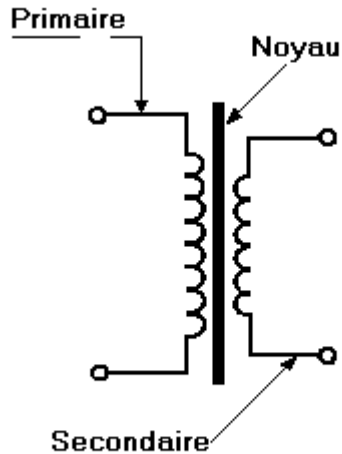


Figure 27 : Symbole du transformateur électrique

On indiquera au secondaire un nombre de tours supérieur ou inférieur au nombre de tours au primaire selon que l'on souhaite élever ou baisser la tension

Ce document n'abordera pas le cas du transformateur réel. Cependant notons que les pertes au niveau d'un transformateur sont liées au perte par effet joules dans les fils conducteurs, perte dans le noyau magnétique par courant de Foucault et hystérésis , couplage magnétique imparfait des enroulements. La modélisation réel d'un transformateur devient alors beaucoup plus complexe et à cela il faut rajouter des inductances mutuelles des enroulements et des capacités parasites dans le circuit.

VIII.2 La Commutation électrique

La commutation électrique est de loin l'élément technologique le plus complexe. Dans cette expérience nous avons essayé quatre types de commutation. Nous avons opté pour deux approches. La première consiste à utiliser une commutation dont le principe physique de fonctionnement est simple, exemple tube à décharge à gaz et la seconde approche consiste à utiliser des semi-conducteurs, exemple (Thyristor). Les performances des semi-conducteurs sont nettement supérieures à la première catégorie des commutateurs mais la physique des semi-conducteurs est beaucoup plus complexe, dans ce chapitre nous ne présenterons que leur principe de fonctionnement et nous détaillerons les résultats expérimentaux de chaque commutation utilisée.

A) TUBE A DECHARGE A GAZ (GAS DISCHARGE TUBE, GDT)

Cet élément est en général utilisé comme fusible pour protéger les circuits, au delà d'un seuil de tension, il devient conducteur et protège le circuit soumis à des surtensions.

Nous l'utiliserons dans le circuit comme un commutateur, à une tension définie il devient conducteur pendant un instant très court. Le GDT est composé d'un tube rempli de gaz sous pression (même principe que les néons pour l'éclairage) et de deux électrodes. La pression du gaz contenu dans le tube, sa nature du gaz et les dimensions du tube détermine la tension pour former un arc électrique entre les deux électrodes.

Pendant son fonctionnement, le GDT émet une lumière à la fréquence de commutation circuit.



Figure 28 : tube à décharge à gaz

B) SIDAC

Un Sidac est un semi conducteur à amorçage bidirectionnel, dans sa fonction il ressemble à une diode Zener qui ne laisse passer le courant dans un seul sens au delà d'un seuil en tension . Le Sidac possède cette même fonction mais pour le courant alternatif c'est dire qu'il laisse passer le courant dans les deux sens, au delà d'un seuil en tension.

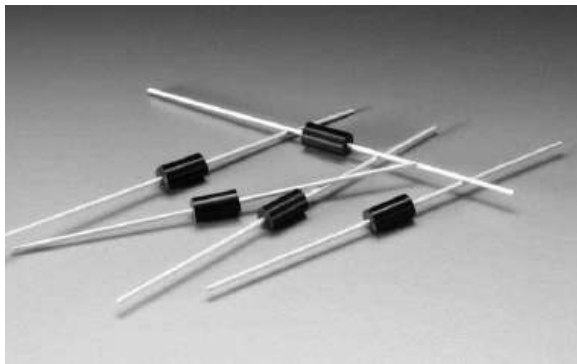
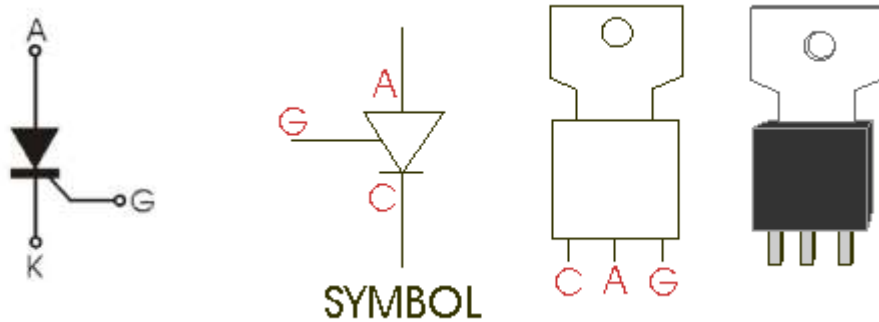


Figure 29 : Sidac et Symbole du Sidac

c) THYRISTOR

Un thyristor est un semi-conducteur commandé à l'allumage pour le rendre passant. Son Symbole est donnée sur la figure si dessous. Il possède une anode, une cathode et une gâchette. Par convention V_{ak} est la tension entre l'anode et la cathode du thyristor, I_{ak} est le courant considéré comme positif lorsque traversant le thyristor de l'anode vers la cathode et I_g est courant considéré comme positif lorsque rentrant sur la gâchette.



A est l'Anode, C la cathode et G la gâchette. Le Thyristor conduit lorsque un courant circule dans la gâchette et pour le bloquer il faut soit annuler le courant I_{ak} soit annuler ou inverser le courant V_{ak} .

IL est utilisé pour la commande de puissance, il supporte des tensions et des courants élevés, (exemple 600V, 4A).

D) IGBT

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) est un interrupteur électronique de la famille des transistors principalement utilisé dans la commande des circuits nécessitants de la puissance électrique. le symbole de semi-conducteur est représenté ci-dessous, avec E l'émetteur, C le collecteur, et G la gâchette.

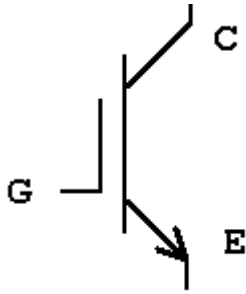


Figure 30 : Symbole de L'IGBT

le tableau ci-dessous situe l'IGBT dans la famille des transistors en fonction de la tension du courant et la fréquence de commutation, il apparait qu'il possède une fréquence de commutation beaucoup plus rapide que celle du Thyristor. En particulier pour faire osciller un circuit à des fréquences élevées il parait très bien adapté. Nous verrons aussi que suivant nos expérience nous avons réussi à faire fonctionner un Thyristor à une fréquence voisine de 8KHz, supérieure à celle indiquée dans ce tableau.

	Thyristor	Thyristor rapide	Transistor bipolaire	IGBT
Tension	6000V	1500V	1400V	1200V
Courant	5000A	1500A	500A	400A
Fréquence	1kHz	3kHz	5kHz	20kHz

L'IGBT est commandé avec un signal sur la gâchette, nous avons utilisé un circuit très simple composé d'une alimentation DC une résistance et un générateur de signal branché sur la gâchette pour comprendre son fonctionnement.

III.3 MODULATION DE LA FREQUENCE DE CHARGE ET DE DECHARGE DU CONDENSATEUR EN MODULANT L'AMPLITUDE DE CHARGE DE LA CAPACITE.

Le principe de cette méthode consiste à faire varier la tension d'alimentation pour influencer sur la période de charge du condensateur et par conséquent sur la période de charge. Le circuit suivant est proposé, en série avec la résistance un transformateur est inclus dans le circuit pour faire varier la tension au borne de la capacité.

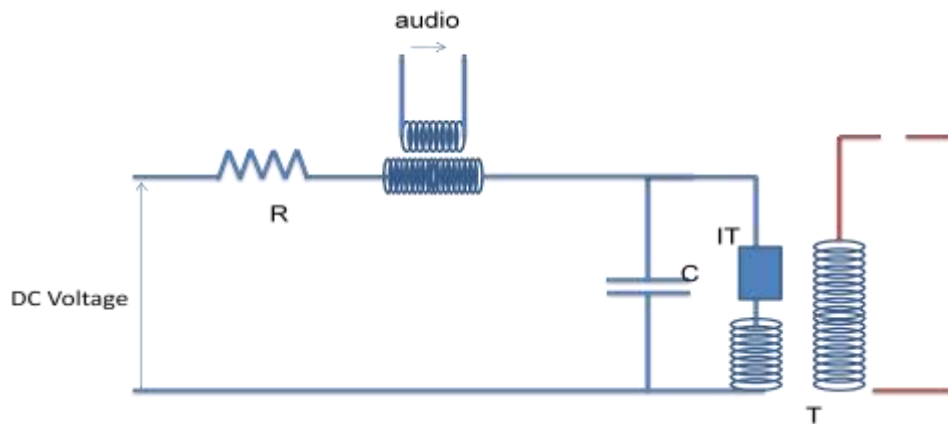


Figure 31: circuit électrique permettant de faire varier la période de charge du condensateur

Le transformateur ajoute le signal électrique produit par exemple par un lecteur CD, le niveau du signal étant faible il est nécessaire de l'amplifier à l'aide d'un amplificateur qui n'est pas représenté dans le circuit et ensuite le transformateur isole le circuit de l'audio et amplifie le signal pour le porter à un niveau suffisant pour influencer le temps de charge de la capacité.

La variation de la tension électrique fera varier la période de charge et de décharge du condensateur autour de la période nominale que l'on a appelé porteuse et qui est définie par la figure 2

IX. Résultats expérimentaux obtenues avec les interrupteurs à seuil

a) Commande : tube de décharge à gaz

Ce premier interrupteur très simple à utiliser ferme le circuit pendant un temps très bref au delà de la tension de seuil choisi. Deux tubes à décharge à gaz ont été utilisés, un tube avec un seuil à 75 V et un tube avec seuil plus élevé à 95V. Après des mises au point du circuit qui ont consommées plusieurs tubes à gaz, la valeur de la capacité de 0.40 microfarad associée à une résistance de 10KOhms a permis de générer les premiers arc électriques. L'expérience montre qu'il faut une capacité minimale pour pouvoir générer un arc électrique. En effet en raisonnant en terme d'énergie, l'énergie disponible dans la capacité est égale à :

$$E = \frac{1}{2} C V^2$$

à tension V fixé, une valeur C de 0.42 microfarad permet de générer un arc électrique. Nous avons aussi doublé la valeur de la capacité à 0.9 microfarad, l'intensité d'arc électrique est plus forte mais la période d'oscillation de la charge et de décharge est plus grande, fréquence plus faible.

Nous avons testé les limites de ce circuit. Au delà d'une fréquence de 1.5 KHz, le tube à gaz chauffe et il se détériore rapidement.

Une fréquence plus importante d'oscillation de la charge et décharge de la capacité produit un arc électrique plus intense et la distance entre les électrodes peut être plus grande de l'ordre du cm

La figure 11 ci-dessous montre la variation de la tension au borne de la capacité de l'ordre de 100 V, (avec interrupteur à seuil de 95V, il conduit ici autour de 100V), et la figure 12 montre la variation de la tension au borne du primaire, la tension est également crête à crête est de l'ordre de 100V.

On remarque que la décharge rapide du condensateur, la résistance de décharge étant très faible, le signal au borne du primaire est une période de sinus à une fréquence élevée. Cette fréquence étant définie par le circuit RLC, R est la résistance faible des fils et de la bobine de l'ordre de quelques Ohms, et la self L de l'inductance du primaire et la capacité C du circuit, ($LC\omega^2=1$) .

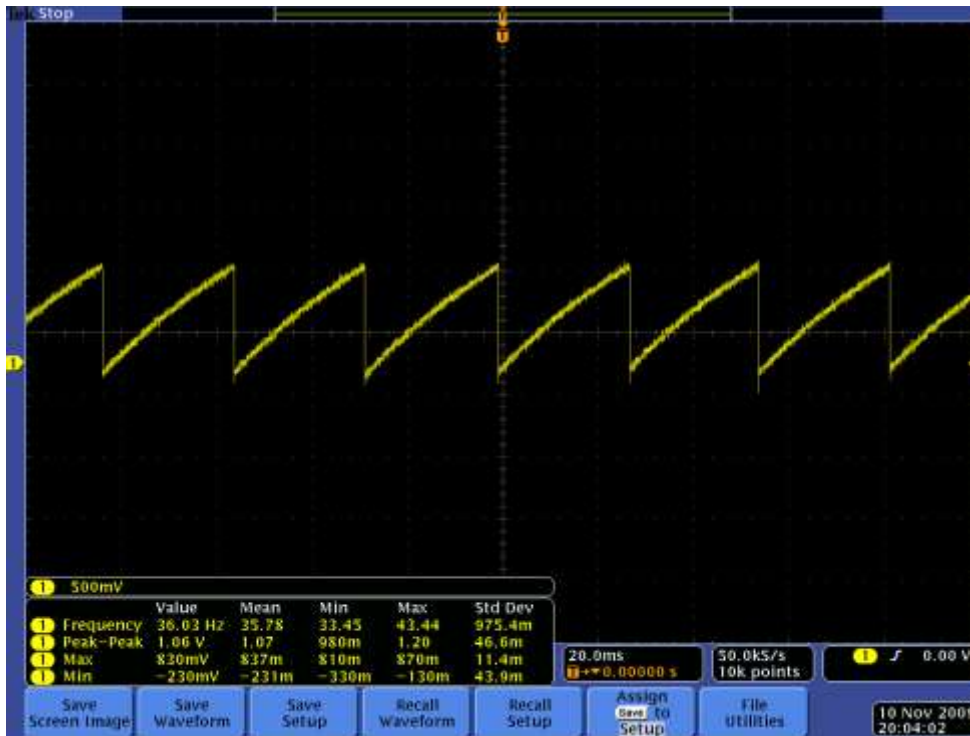


Figure 32: Décharge de la capacité à l'aide du tube à gaz, les tensions sont à multipliés par 100, (sonde diviseur par 100)

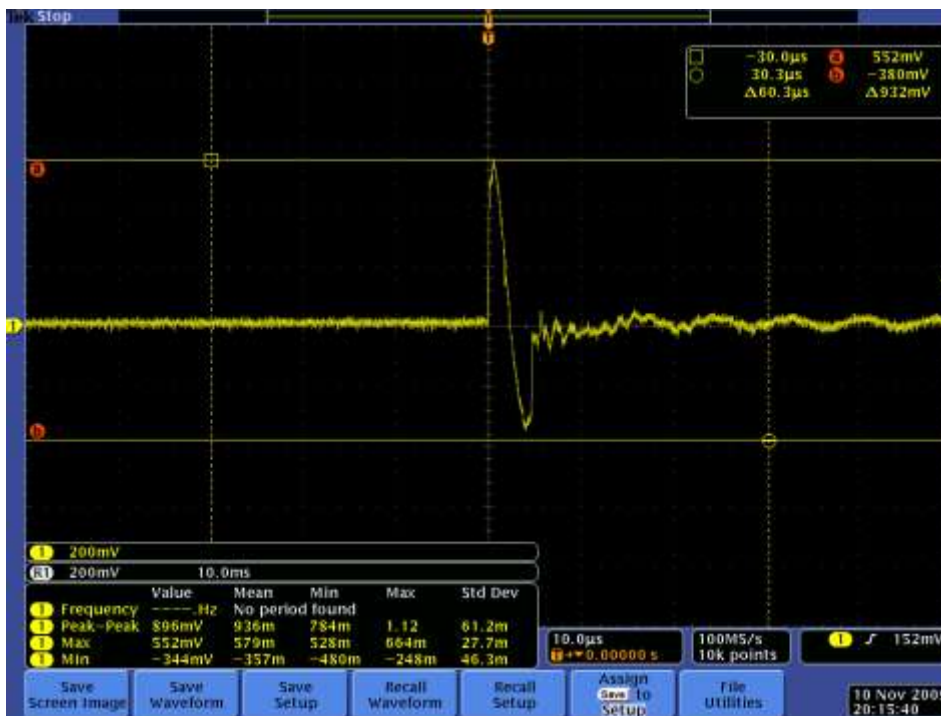


Figure 33: tension du borne du primaire, (tension x 100).

b) Commande utilisant un Sidac

La commande utilisant un Sidac donne des résultats similaires à ceux obtenus avec le tube à gaz, par contre il est possible de monter la fréquence de charge et de décharge du condensateur jusqu'à environ 2.KHz. Au delà de cette fréquence, en élevant la tension pour augmenter la fréquence, il se produit l'inverse et le Sidac cesse de fonctionner, il devient toujours conducteur. Il faut baisser la tension d'alimentation à zero volt et ensuite recommencer pour déclencher le seuil de fonctionnement du SIDAC. La photo ci-dessus montre l'arc électrique entre deux électrodes en cuivre. La couleur de l'arc est bleue et le son est régulier.



Figure 34 Arc électrique formé à 2KHz

C) Commande avec un Thyristor

Pour utiliser le Thyristor avec une tension à seuil, on propose la commande suivante:

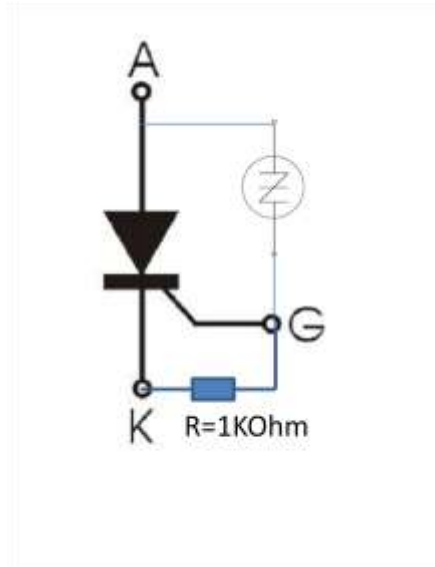


Figure 35: commande avec Thyristor, déclenchement à seuil

La gâchette est commandée par la tension entre l'anode et la cathode. Le premier montage utilisait une diode Zener à 90 V, mais nous n'avons pas réussi à faire fonctionner le thyristor en mode seuil, c'est à dire qu'une tension au-delà de la tension de seuil de la diode Zener laisse passer le courant dans la gâchette et déclenche le Thyristor, cette première étape est réussie avec la diode Zener mais ensuite le Thyristor reste toujours conducteur. Notre explication de ce phénomène est qu'il circule toujours un courant dans la gâchette même faible qui ne permet pas de désamorcer la gâchette.

A la place nous avons utilisé un Sidac qui remplit la même fonction que la diode Zener par contre le Thyristor fonctionne mieux, il devient conducteur dès que la tension dépasse le seuil de déclenchement de la tension du Sidac ensuite au passage à zéro, le Thyristor se bloque et permet à la capacité de se recharger.

La figure ci-dessous montre la génération d'un arc électrique à une fréquence de 5KHz. L'arc électrique est intense. En augmentant l'amplitude de la tension du générateur, la fréquence maximale obtenue avec cette commande est de 8KHz. La variation de la fréquence permet d'entendre un son qui varie en fonction de la fréquence et démontre la faisabilité du haut parleur. Nous avons deux vidéos montrant ce phénomène.

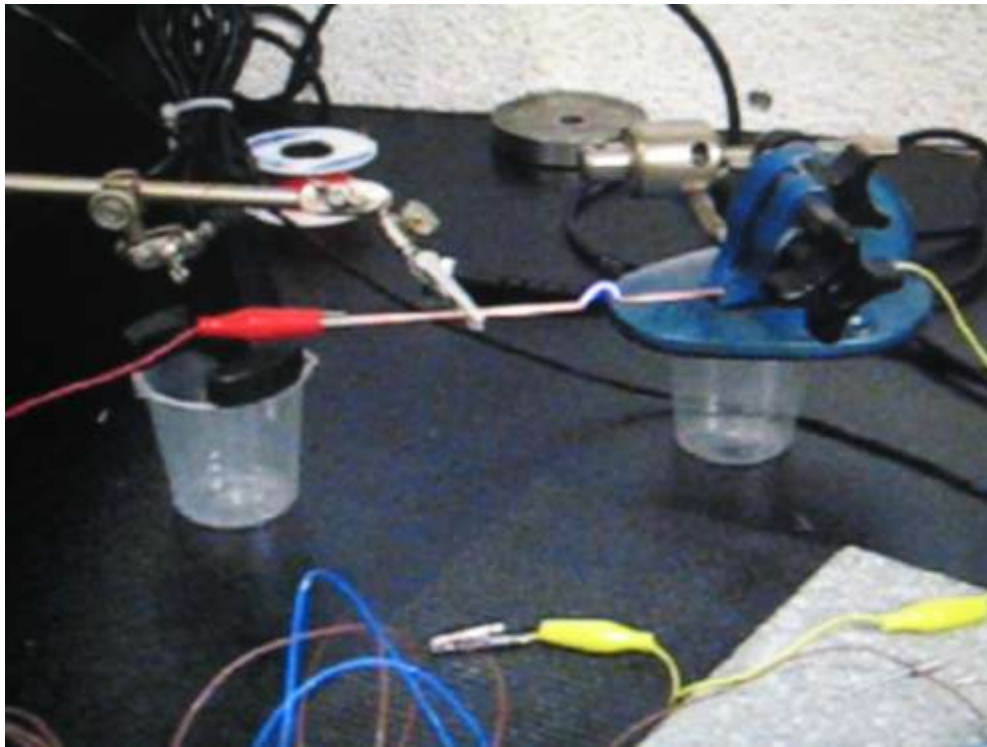


Figure 36 Arc formé à 5KHz, électrodes en cuivre



Figure 37: arc formé avec des électrodes en tungstène

Nous avons remarqué que l'arc électrique oxyde les électrodes en cuivre. En effet il se forme une couche de couleur différente sur la surface du métal et la formation de l'arc électrique devient plus difficile. Il faut régulièrement gratter les électrodes pour enlever cette mince couche d'oxyde. Nous avons fait l'expérience avec des électrodes en tungstène car c'est ce matériau qui est utilisé pour la soudure à l'arc électrique. L'arc électrique est très différent comme le montre la figure 16, couleur blanche et il n'est pas nécessaire de gratter les électrodes.

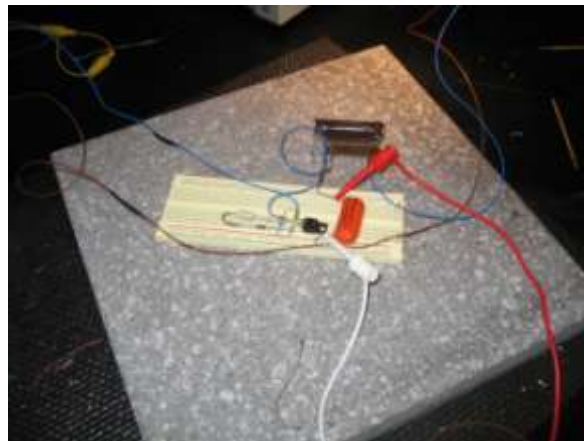
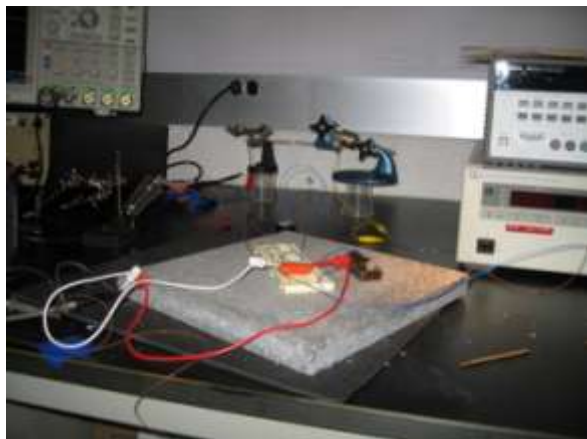


Figure 38: Circuit électrique avec la commande Thyristor, utilisation d'un transformateur 7000V maxi en sortie

X. Rembobinage du primaire du transformateur

Il a fallu qu'on démonte le transformateur pour comprendre que les fils du primaire étaient en court-circuit, en effet les fils étaient noirs.

Les photos ci-dessous illustrent les étapes de démontage et de remontage du primaire du transformateur. Nous avons pris un fil plus gros, avec un meilleur isolement et nous avons effectué l'enroulement à la main en évitant de faire chevaucher les fils.

Après remontage le transformateur fonctionne parfaitement. La résistance mesurée au primaire est de 0.4 Ohms et son inductance est de 150 mH.



Figure 39 : Etape de démontage et de remontage du primaire du transformateur

XI. Schéma du circuit de modulation Delta Sigma de l'audio

Annexe 2 : Schéma du circuit de commande de l'interrupteur avec la modulation Delta-Sigma

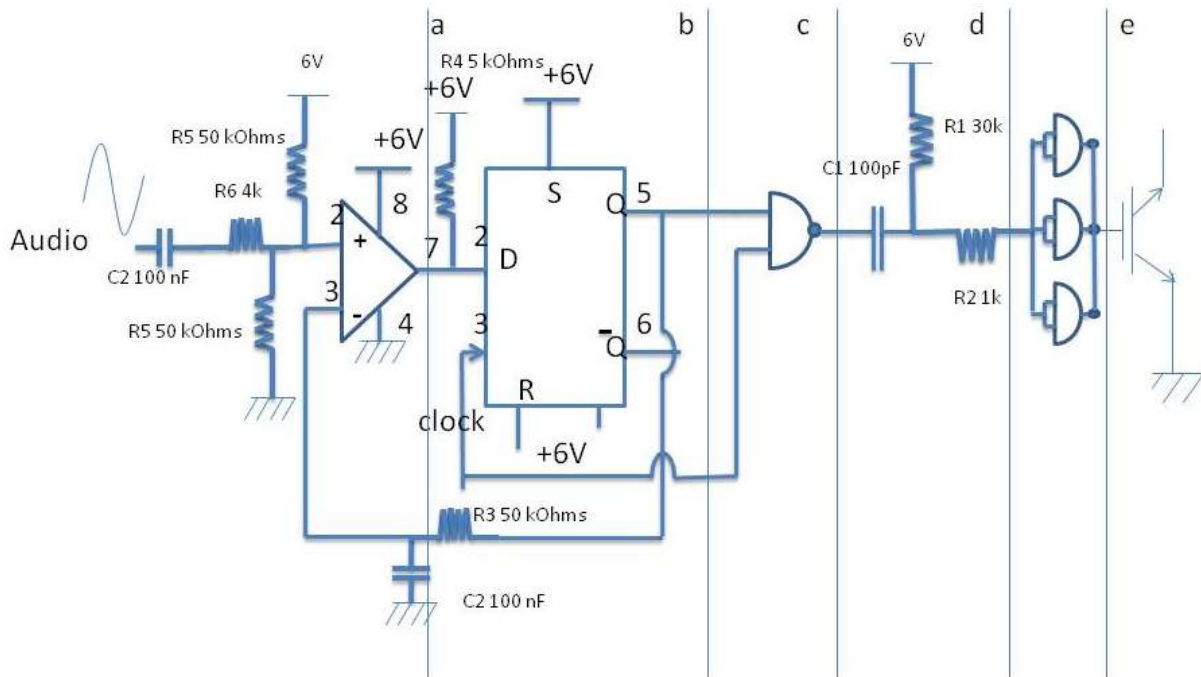


Figure 40: Modulation Delta Sigma du signal audio