

APPLICATIONS DES ARCS ELECTRIQUES

G. Daveau, T. Martire, J.J. Huselstein, P. Enrici
Institut d'Electronique du Sud - Groupe et Energie Matériaux
- Université Montpellier II -
CC079 Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 05
guillaume.daveau@univ-montp2.fr, martire@univ-montp2.fr,
huselstein@univ-montp2.fr, enrici@univ-montp2.fr

Résumé :

L'objet de cet article est de mettre en avant la multitude d'applications liées de près ou de loin au arcs électriques. Nous nous attachons dans un premier temps à définir le phénomène. Nous présentons ensuite différentes applications. Enfin, nous mettons en oeuvre une maquette pédagogique permettant de réaliser un arc électrique. Cette maquette peut être réalisée au cours de projets de L3 ou de M1, mais elle peut également faire l'objet de TP de part le fonctionnement particulier du système de conversion d'énergie. L'attractivité de la maquette largement démontrée permet d'une part de sensibiliser les étudiants aux aspects plus théorique du fonctionnement du montage, et d'autre part, de mettre en avant l'importance et la place de la gestion d'énergie électrique vis à vis du grand public.

Mots clés : arcs électriques, échelle de Jacob, hacheur bipolaire, résonance

1 Introduction

Dans le cadre de l'enseignement du Master Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur de l'Université de Montpellier II, nous avons mis oeuvre une séance de travaux pratiques concernant la génération d'arcs électriques liée au module applications modernes de l'énergie électrique.

Les objectifs sont de sensibiliser les étudiants aux différentes difficultés liées à la génération d'une haute tension.

Ainsi les étudiants font l'apprentissage de ce qu'est un arc électrique, et de la multitude d'application qui y sont liées tout en mettant en oeuvre une chaîne de conversion d'énergie fonctionnant sur le principe d'un système résonnant.

Les élèves travaillent en binômes sur une séance de 4 heures et fournissent un compte-rendu.

Ils abordent ainsi :

- l'influence des capacités parasites des transformateurs haute tension,
- le fonctionnement d'un hacheur bipolaire résonnant,
- les problèmes de CEM, et le filtrage de mode commun.

2 Historique

Les arcs électriques sont des phénomènes naturels qui ont pu être observés depuis la nuit des temps : la foudre. Il a fallu attendre le cours de l'année 1813 pour que le premier arc électrique artificiel soit généré par le physicien anglais Humphrey Davy . Il venait d'ouvrir la porte vers un immense champ

d'applications.

En effet, les ingénieurs ont rapidement compris le parti qu'ils pouvaient tirer d'un tel phénomène. Ainsi, dès 1880, les trois propriétés fondamentales de l'arc électrique étaient découverte et mises en application :

- flux radiatif intense (Lampe à arc à haut flux, Léon Foucault, 1844)

- possibilité de favoriser les réactions chimiques (Synthèse de l'acétylène en atmosphère d'hydrogène, Marcellin Berthelot, 1862)

- flux thermique élevé (Soudure à l'arc, Louis Clerc, 1880)

L'apparition des théories modernes de la physique alliées aux maîtrises de conceptions industrielles vont permettre peu à peu la mise en oeuvre de démarches scientifiques conduisant à une meilleure connaissance des propriétés fondamentales de l'arc électrique laissant place à l'empirisme qui était la règle.

On citera La Loi de Paschen, énoncée par le physicien allemand Friedrich Paschen en 1889, indiquant que l'apparition d'un arc électrique dans un gaz, à un certain champ électrique de claquage (dit champ disruptif). Cette fonction étant généralement non linéaire du produit de la pression du gaz par la distance entre les électrodes.

Ces dernières décennies, l'arc électrique a fait l'objet de nombreuses études fondamentales en étroite collaboration avec les organismes industriels concernés. On trouve, dans la littérature, des définitions très différentes de l'arc électrique. On admet généralement que le nom d'arc électrique est

associé à une décharge à forte densité de courant pour laquelle les processus thermiques sont dominants [1].

3 Définition

Un arc électrique est un courant électrique visible dans un milieu isolant (gaz, vide).

Un arc se crée entre deux surfaces de conducteurs par une ionisation du gaz lorsque la différence de potentiel entre les deux électrodes est suffisamment élevée.

On définit le champ disruptif du gaz exprimé en V/m. L'air présente par exemple des champs disruptifs compris entre 3kV/mm et 6kV/mm en fonction de la pression atmosphérique et de l'humidité ambiante.

Une fois ionisé, le gaz crée un canal conducteur qui entraîne un arc continu tant que la différence de potentiel reste suffisante.

En théorie, la position de l'arc électrique est stable (principe de l'énergie minimale). Toute fois, nous verrons par la suite que cette caractéristique reste discutable.

L'écoulement du courant dans la matière ionisée émet un rayonnement de lumière dont le spectre est caractéristique de la nature du gaz, et à un degré moindre, de celle des électrodes.

Cette ionisation et l'écoulement d'un courant électrique qui s'en suit engendrent également des bruits dus à l'expansion brutale du gaz suite à son échauffement tout aussi brutal (propriété également exploitée dans diverses applications) [2].

4 Applications des arcs électriques

Les applications liées de près ou de loin aux arcs électriques sont nombreuses. Certaines sont (re)connues et industrialisées depuis longtemps, d'autres ne sont encore que des idées ou projets scientifiques. Il existe un très grand nombre d'applications et d'études des arcs électriques portant sur la fiabilité de systèmes et leurs comportements face aux décharges électriques (disjoncteurs, EDF, avionique, etc...) [3], mais également des études concernant les phénomènes d'éclairs naturels en météorologie, médecine, et également en électronique de puissance pour les aspects CEM [4]. Nous allons brièvement présenter certaines de ces applications.

4.1. Lampe à arc

Les lampes à arc créent de la lumière en faisant jaillir une étincelle qui passe d'une électrode à l'autre. Cette lumière brille bien plus que toutes les sources d'illumination jamais inventées auparavant.

Aujourd'hui, le développement et la fabrication de lampes à décharge d'arc sont destinées à des applications industrielles précises telles que le pompage lasers, la photographie moyenne et forte

puissance, la médecine, les simulations solaires, les feux anti-collision pour l'aéronautique...

On retrouve également les lampes à arc dans le domaine grand public pour des applications d'éclairage permettant d'atteindre de haut rendement. Par exemple les lampes à ballon fluorescent (improprement appelées tubes néons), les lampes aux halogénures métalliques (éclairage blanc des stades), les lampes au Xénon (certains phares d'automobile, les projecteurs de cinéma).

4.2. Four à arc

Le premier à avoir mis en avant l'application des arcs électriques pour le chauffage à haute température est Henri Moissan en 1892 réalisant un four permettant d'atteindre jusqu'à 3500°C. Il isolera ainsi plusieurs métaux et mettra au point la fabrication de plusieurs composés tels que les carbures [2].

Au début du XX^{ème} siècle sont apparus les premiers fours à arc industriels destinés à fondre un métal primaire (généralement ferraille) pour obtenir un acier. Depuis cette époque, bien que reposant sur les mêmes principes de base, les fours à arc ont connu un développement important aussi bien du point de vue technologique que du point de vue capacité de production. En effet, la capacité des fours modernes avoisine les 200T avec une consommation énergétique comprise entre 400 et 500 kWh/t.

4.3. Soudure à arc

Le soudage à l'arc électrique est le plus connu des procédés de soudure. Il existe différentes méthodes de soudage électrique (électrodes enrobées, électrode non-fusible, électrode fusible). La plus utilisée est le soudage à arc électrique avec électrode enrobée. Lorsqu'on approche l'électrode enrobée des pièces à assembler, il se crée un arc électrique qui dégagera un fort pouvoir calorifique qui provoque la fusion de l'électrode [2].

4.4. Bougies d'allumage

La bougie d'allumage est l'élément qui crée l'étincelle dans le cylindre pour permettre l'explosion du carburant dans le moteur dit "à explosion" (utilisé dans nos motos et voitures actuelles).

Au du siècle, une même bougie pouvait être utilisée pour tous types de véhicules, car il suffisait à l'époque de faire une étincelle, sans se soucier de ses caractéristiques ni des problèmes liés à la dissipation des calories du moteur.

4.5. Appareils de coupure

La coupure d'un courant électrique est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF₆, ...) ou dans un milieu isolant. Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'établit entre les contacts. On cherche alors à maîtriser et éteindre l'arc le plus rapidement possible.

Pour ce faire, on peut par exemple "souffler" l'arc à l'aide d'un gaz sous pression. L'arc crée lors de l'ouverture du disjoncteur est "soufflé" par un gaz sous pression présentant de bonnes caractéristiques diélectriques (comme le SF₆).

4.6. Torche à plasma

Une torche à plasma est un dispositif permettant d'atteindre de très hautes températures : 1600°C. Sa conception trouve son origine dans l'étude de matériaux destinés à protéger les missiles ou les engins spatiaux durant leur traversée de l'atmosphère [2].

Aujourd'hui, elles sont utilisées comme une solution de recyclage pour les déchets dangereux (résidus d'incinération, amiante, déchets faiblement radioactifs, poussières, déchets industriels, ...) afin d'éviter l'enfouissement en décharge et le recyclage des "déchets ultimes" (déchets de déchets)[5].

Pour générer le plasma, on met en contact le gaz avec un arc électrique. Cet arc étant amorcé entre deux électrodes (cathode et anode) : c'est le principe de l'arc soufflé.

4.7. Projets et recherche sur les plasmas

Les recherches sur les plasmas, d'abord menées pour comprendre le foudroiement des avions, touchent aujourd'hui des domaines aussi variés que l'aéronautique, la combustion ou la furtivité. Les applications potentielles sont aussi énormes que les difficultés.

4.7. Échelle de Jacobs

L'application étudiée dans le TP est appelée échelle de Jacob ("Jacobs' ladder"). Le schéma du dispositif est donné figure 1. Lorsque le champ électrique entre les électrodes est suffisamment élevé, un arc se déclenche à l'endroit où les électrodes sont le plus proche. Une fois l'arc déclenché, il crée un canal d'air ionisé conducteur. L'apparition de ce canal conducteur engendre une élévation de la température au voisinage de l'arc. Cette élévation locale de la température déclenche un phénomène de convection qui a tendance à élever les ions présent autour de l'arc. De ce fait, la résistance équivalente du canal ionisé va être plus faible sur la partie supérieure de l'arc. L'arc électrique ainsi créée suivra le chemin électrique présentant la résistance la plus faible, il monte alors le long des deux électrodes. Lorsque la distance entre les deux électrodes devient trop grande devant leur différence de tension, il y a une rupture de l'arc électrique qui va ensuite de façon très rapide recréer un nouveau canal d'air ionisé à la base des électrodes, endroit où le champs électrique est maximal [6].

Nous avons choisi de présenter une échelle de Jacob pour diverse raison. Tout d'abord, ce type de dispositif est largement utilisé dans les laboratoires de recherches à différentes fins. Il permettent en

effet d'étudier de façon précise le comportement des arcs électriques, mais également les différents effets engendrés par les arcs électriques (destruction de déchets ultimes, comportement de systèmes électriques et mécaniques face aux décharges électriques, décomposition de gaz, ...).

Enfin, ce système est simple à mettre en oeuvre pour un coût très faible. D'un point de vue pédagogique, les manipulations et mesures pouvant être effectuées sur le dispositifs sont aussi nombreuses que les applications présentées. Le pouvoir d'attraction de ce type de maquettes pédagogique est également non négligeable.

5 Génération d'un arc électrique

Pour générer un arc électrique, il faut -d'après la définition précédente- créer un champ électrique supérieur au champ disruptif du milieu. Pour ce faire, on doit appliquer une très haute tension entre deux électrodes situées à une distance relative à la tension et au champ disruptif du milieu. En considérant V comme étant la tension au bornes des électrodes, E_{dis} comme étant le champs disruptif du milieu, et l_{max} comme étant la distance maximale entre les électrodes, on exprime alors :

$$l_{max} = \frac{V}{E_{dis}}$$

Pour le cas présenté, le milieu est l'air ambiant. Dans ces conditions, le champ disruptif est d'environ 5KV/mm. Pour créer un arc électrique dans l'air d'une longueur de 1cm, il faut donc appliquer une tension de l'ordre de 50KV ; pour créer une telle tension, il faut tenir compte des risques électriques.

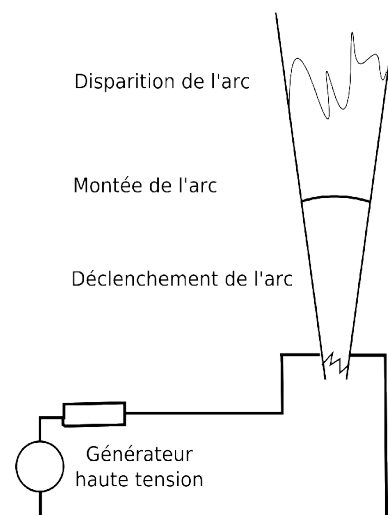


Fig 1: Fonctionnement d'une échelle de Jacobs

Il existe de nombreuses possibilités pour générer une haute tension. Dans les systèmes d'allumage d'automobile par exemple, la haute tension est générée à partir de la tension continue de la batterie associée à un convertisseur de puissance de type alimentation FlyBack. Elle était par le passé commandées mécaniquement par un "rupteur".

Aujourd'hui le principe reste le même, mais ils présentent un ensemble de capteurs de contrôle de température, pression, etc... et le rupteur est remplacé par un composant actif de puissance (type IGBT ou Thyristor).

La méthode que nous avons choisie pour générer de la haute tension est sensiblement différente. En effet, nous utiliserons comme pour un système d'allumage un transformateur présentant un rapport de transformation très important (ici 1200).

Le rapport de transformation du transformateur étant très élevé, nous pouvons générer une très haute tension au secondaire à partir d'une tension relativement faible au primaire. Ainsi, avec une tension au primaire du transformateur de 50V, on obtient (en théorie) une tension de sortie de 60kV, soit un arc électrique de longueur comprise entre un et deux centimètres dans l'air.

La différence avec un système d'allumage vient du fait que nous allons générer une tension sinusoïdale de valeur moyenne nulle. Pour ce faire, nous avons associé une alimentation continue, un hacheur bipolaire, une inductance et un transformateur. Le hacheur bipolaire utilisé est issu d'une maquette pédagogique, on pourra ainsi modifier facilement la fréquence à l'aide d'un potentiomètre numérique.

La difficulté ici vient du fait que la capacité parasite lié au grand nombre de spires au secondaire du transformateur est assez importante (de l'ordre de quelques pico-Farad). De plus, cette capacité parasite est vu par le primaire du transformateur comme une capacité 1200*1200 fois plus importante (de l'ordre de quelques micro-Farad). Pour pouvoir alors générer une tension sinusoïdale aux bornes du primaire du transformateur, nous devons l'exciter avec un courant sinusoïdal. Pour ce faire, nous avons placé en série avec les enroulements primaires du transformateur une inductance. Il suffit alors d'exciter le circuit LC(T) avec une tension sinusoïdale (ou carré) à la fréquence de résonance du circuit pour créer une tension sinusoïdale d'amplitude significative aux bornes des enroulements primaires du transformateur. Le schéma équivalent du montage est donné figure 2. Le terme R représente les pertes joules. Il permet de définir le facteur de qualité du circuit résonant.

On définit :

$$Q = \frac{L\omega}{R}$$

On peut exprimer l'impédance du circuit :

$$Z_{eq} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

On retrouve alors une expression de la fréquence de résonance :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

On peut à cette fréquence exprimer la valeur maximale du courant dans le circuit. Soit en notant V_{max} comme la valeur maximale de la première harmonique de la tension d'entrée :

$$I_{max} = \frac{V_{max}(f=f_{res})}{R} = \frac{Q V_{max}(f=f_{res})}{L\omega}$$

On retrouve alors une expression de la tension aux bornes des enroulements primaires du transformateur :

$$V_{primaire_{max}} = V_{C_{max}} = I_{max} \frac{1}{2\pi f_{res} C}$$

Soit en fonction de la tension d'entrée :

$$V_{primaire_{max}} = Q V_{max}(f=f_{res})$$

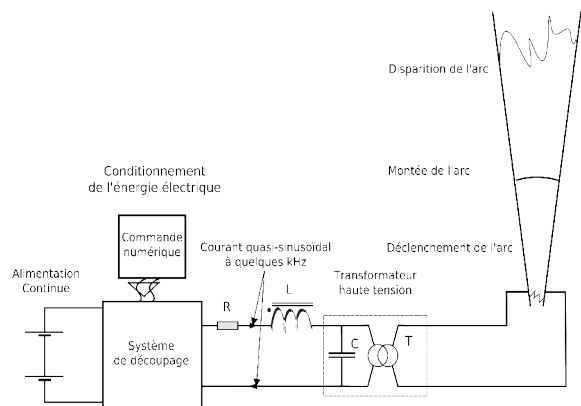


Fig 2: Chaîne de conversion d'énergie électrique

En considérant Q comme constant, on remarque qu'il est possible de générer une tension significative aux bornes des enroulements primaires du transformateur tout en limitant le courant d'entrée, ceci en choisissant une inductance de valeur importante. En revanche, augmenter la valeur de l'inductance implique également une diminution de la valeur de la fréquence de découpage. Or, le transformateur est dimensionné pour le fonctionnement suivant : 100V/120kV/20kHz. Ainsi, si on fonctionne à des fréquences inférieures à 20kHz, la tension d'entrée doit impérativement être inférieure à la tension indiquée car les pertes au sein du matériau magnétique ainsi que les phénomènes de saturation seront amplifiés. De ce fait, il faut choisir un bon compromis pour la valeur de l'inductance de sorte que le matériau magnétique ne soit pas saturé, présentant ainsi un facteur de qualité raisonnable, tout en limitant le courant d'entrée au maximum.

6 Déroulement de la séance de TP

Le photographie 3 présente le banc de mesure. On distingue clairement les différents éléments cités précédemment. La sonde de tension permet de mesurer la tension aux bornes du primaire du

transformateur. La sonde de courant permet de mesurer le courant de sortie du système de découpage. La partie commande et la partie puissance sont des démonstrateurs pédagogiques permettant un fonctionnement du système selon différents modes (hacheur, onduleur...). La commande, entièrement numérique, s'organise autour d'un FPGA. La partie puissance est composée par trois bras d'onduleur, respectivement formées par deux IGBT. On peut également modifier la fréquence de découpage ainsi que le rapport cyclique simplement à l'aide de codeurs incrémentaux [7].

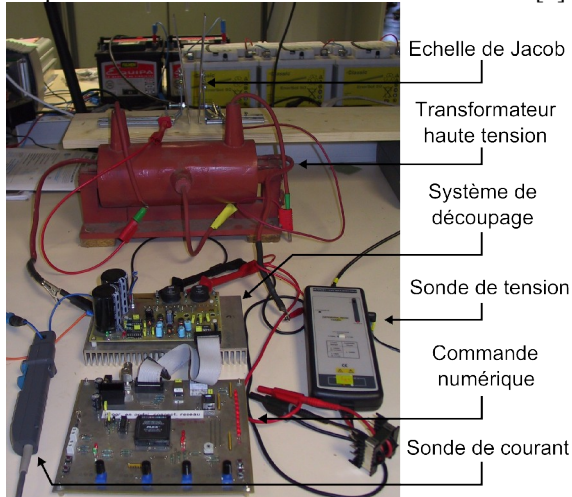


Fig 3: Photographie du banc de mesure

6.1 Mesure de la capacité parasite du transformateur

Une première série de mesure permet d'identifier la valeur de la capacité parasite ramenée au primaire du transformateur. Le principe est simple, on a réalisé le montage avec deux inductances de valeurs connues et différentes, puis on ajuste la fréquence de découpage pour se placer à la résonance. On mesure alors la valeur de la fréquence de découpage qui nous donne immédiatement la valeur de la capacité parasite ramenée au primaire du transformateur :

$$C = \frac{1}{(2\pi f_{res})^2 L}$$

Soit pour $L=36\mu\text{H}$, $f_{res}=7\text{kHz}$, et $C=14\mu\text{F}$. Et pour $L=175\mu\text{H}$, $f_{res}=3,3\text{kHz}$, et $C=13\mu\text{F}$. On peut se rassurer en voyant que ces résultats sont proches et donc cohérents.

Pour travailler à une fréquence proche de 20kHz avec une telle capacité au primaire, il faut une inductance de valeur très faible, ce qui va engendrer un courant très important. Pour créer un arc électrique de longueur réduite (quelques centimètres), une tension de quelques dizaines de kilo volts est suffisante. Ainsi, il n'est pas nécessaire de dépasser une tension primaire de quelques dizaines de volts. On peut dans ce cas réduire la fréquence de découpage du système sans augmenter de façon significative les pertes dans le matériau magnétique. On pourra alors obtenir la valeur de

tension de sortie désirée tout en limitant le courant d'entrée à délivrer. On choisira alors une inductance de $36\mu\text{F}$ soit une fréquence de résonance de 7kHz.

6.2 Mesures du comportement du circuit avant le déclenchement de l'arc

La figure 4 présente la tension aux bornes du primaire du transformateur ainsi que le courant d'entrée, ceci avant que l'arc ne se déclenche pour une tension d'entrée comprise entre +3V et -3V. On constate que le point de fonctionnement est très proche de la résonance (tension et courant quasiment sinusoïdaux et d'amplitude maximale). On mesure alors pour une tension maximale au primaire de 7V, soit un facteur de qualité d'environ 4. Ce qui nous donne un courant maximal théorique de 6,2A (on mesure environ 6A max).

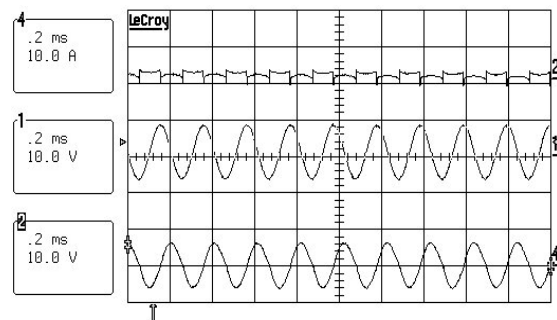


Fig 4: Tension d'entrée, tension aux bornes du primaire du transformateur, et courant dans le circuit pour une tension d'entrée rectangulaire d'amplitude 6Vpp avant le déclenchement de l'arc électrique

6.3 Mesure du comportement du circuit une fois l'arc déclenché

La figure 5 présente la tension aux bornes du primaire du transformateur ainsi que le courant d'entrée, ceci lorsque l'arc est déclenché pour une tension d'entrée comprise entre +9V et -9V. On remarque que lorsque l'arc est déclenché, la tension et le courant sont fortement perturbés, le régime n'est plus sinusoïdal, et la tension chute. En effet, quand l'arc est amorcé, la tension nécessaire pour le maintenir est plus faible que la tension nécessaire pour le déclencher car le canal ionique est déjà créé.

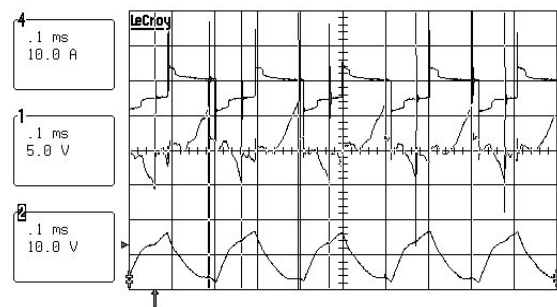


Fig 5: Tension d'entrée, tension aux bornes du primaire du transformateur et courant dans le circuit pour une tension d'entrée rectangulaire d'amplitude 18 Vpp après le déclenchement de l'arc électrique

On remarque également qu'une faible augmentation

de la tension d'entrée va déclencher la protection en courant du système de découpage.

Pour mettre en avant les phénomènes de CEM, les étudiants sont invités à ajouter un filtre de mode commun en entrée du système.

6.4 Filtrage de mode commun

La figure 6 présente la tension aux bornes du primaire du transformateur ainsi que le courant d'entrée, ceci lorsque l'arc est déclenché pour une tension d'entrée comprise entre +9V et -9V.

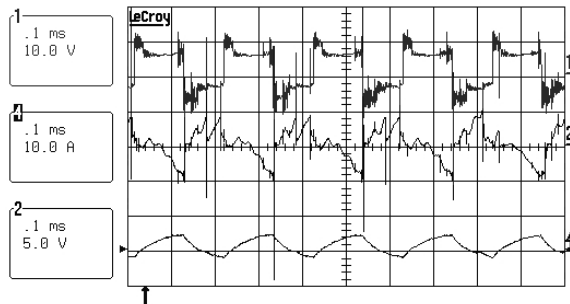


Fig 6: Tension d'entrée, tension aux bornes du primaire du transformateur et courant dans le circuit pour une tension d'entrée rectangulaire d'amplitude 18 Vpp après le déclenchement de l'arc électrique

Les signaux dans ce cas sont beaucoup plus stables, et plus proches des résultats attendus. On peut à présent également augmenter la tension d'entrée sans déclencher les protections.

Les étudiants remarqueront également une faible variation de la fréquence de résonance du montage liée aux inductances de fuite (plus précisément au coefficient de couplage) du filtre CEM.

6.5 Résultats en image

Les photographies 7 présentent les résultats de l'expérience. La photographie de gauche présente un temps de pause faible (1/100s). Celle de droite en revanche a été prise avec un temps de pause de 10s (soit environ 4 montées de l'arc électrique). On distingue également en arrière plan le transformateur haute tension utilisé pour générer l'arc.

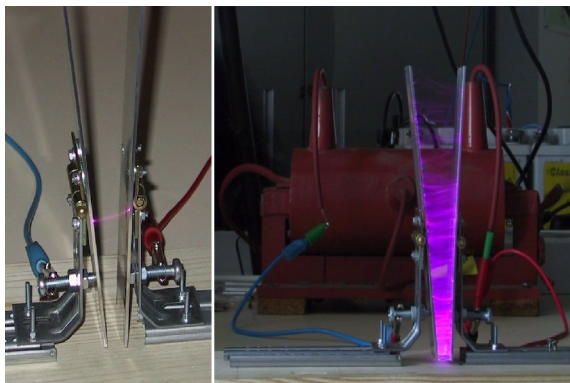


Fig 7: Photographies de l'arc. A gauche temps de pause de quelques centièmes de secondes. A droite temps de pause de 10s

Conclusions

Les arcs électriques sont aujourd'hui présents dans de nombreuses applications allant de l'utilisation quotidienne à l'industrie haute technologie. La mise en oeuvre de ce TP d'électronique de puissance mettant en avant ces phénomènes va donc de soit. Le choix de l'échelle de Jacob se justifie par différents aspects. D'une part, le fonctionnement du dispositif est très attractif non seulement vis à vis des étudiants, mais également vis à vis du grand public. D'autre part, le fonctionnement particulier du transformateur permet de mettre en avant les nuisances des paramètres parasites généralement négligés ainsi que l'intérêt des systèmes résonants, et les problèmes de CEM. Enfin, la simplicité du dispositif de commande et de puissance permettent une approche intuitive facilitant la mise en oeuvre et l'étude du dispositif.

Bibliographie

1. Serge Vacquie, Arc électrique, Techniques de l'ingénieur, Génie électrique, 1995, vol. D4, n°D2870, pp. 1-28
2. <http://fr.wikipedia.org/>
3. Claude Gary, L'arc électrique et ses applications, Revue de Génie Electrique, 1983, vol. 4, pp. 264-5
4. J. L. Cocquerelle C.E.M. et électronique de puissance, édition Technip, 1999
5. <http://www.europlasma.com/>
6. A.A. Fridman, A. Petrousov, J. Chapelle, J.M. Cormier, A. Czernichowski, H. Lesueur, J. Stevefelt, Modèle physique de l'arc glissant, Journal of physics, Aout 1994, pp 1449-1465
7. J.J. Huselstein, T. Martiré, Ensemble pédagogique expérimental hacheur onduleur, CETSIS, Nancy, Octobre 2005