

Construisons une échelle de Jacob

Cette fois, nous allons démontrer de façon spectaculaire l'action d'un champ magnétique sur un plasma à l'aide d'un dispositif appelé « échelle de Jacob »¹.

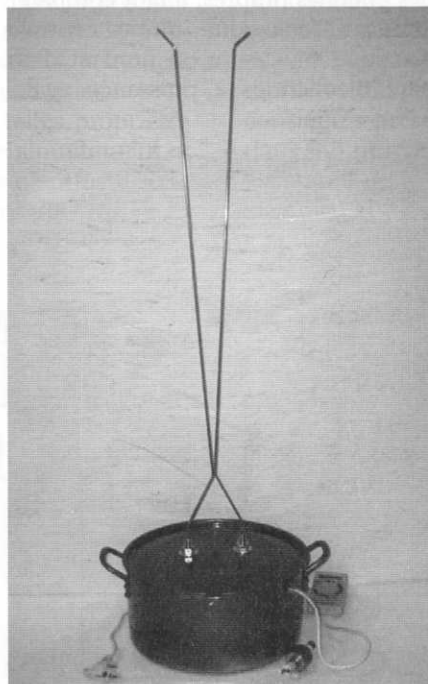
Appareil classique des amphithéâtres du début du XX^e siècle, cette curiosité a sa place dans tous les laboratoires de physique de collège ou de lycée. Il a donné naissance aux parafoudres en forme de corne qui équipent les lignes EDF à moyenne tension de nos campagnes. Le principe en est simple : lors d'un coup de foudre sur la ligne, un arc contourne les isolateurs : il les détruirait rapidement s'il persistait et la surintensité produirait des dommages en divers endroits de l'installation. Ce problème technique est résolu à l'aide d'un parafoudre à cornes : l'arc s'amorce à la base du parafoudre et le champ électrique créé par le courant pousse l'arc vers le haut, le forçant à s'allonger. Au-delà d'une certaine longueur, de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, la tension de 20 kV du réseau n'est plus suffisante pour maintenir l'arc, qui s'éteint. L'ascendance de l'air chauffé pousse aussi l'arc vers le haut et les deux effets concourent à protéger la ligne.

Il nous faut tout d'abord une source de haute tension d'environ 10 keV pouvant fournir une intensité suffisante. Nous éliminerons donc d'office les alimentations THT de moniteurs TV, ainsi que les alimentations haute tension de photocopieurs ou d'imprimantes laser. L'idéal est de récupérer un transformateur destiné à alimenter une enseigne au néon. Les anciens modèles atteignaient 20 kV, mais ils sont maintenant interdits et il est peu courant d'en dénicher. Qu'à cela ne tienne : nous fabriquerons nous-même notre générateur à haute tension en allant piocher dans les entrailles d'un appareil très courant : le four à micro-ondes.

Nous y récupérerons les moteurs, qui nous serviront à construire un générateur Van Der Graaf dans un prochain numéro, et les aimants très puissants du tube, des condensateurs et des diodes haute tension et des transformateurs dont nous allons nous servir aujourd'hui.

Rappelons brièvement le fonctionnement d'un four à micro-onde : la haute tension alternative délivrée par le transformateur est redressée par le circuit doubleur de tension de type Villard constitué d'une diode et d'un condensateur. La haute tension continue est amenée sur

FABRICE DAVID



L'échelle de Jacob |

la cathode chauffée et les électrons sont émis par effet thermoïonique. Un puissant champ magnétique créé par des aimants permanents oblige les électrons à spiraler autour de la cathode au lieu d'aller s'écraser en ligne droite sur l'anode segmentée. Les électrons se rassemblent alors spontanément en paquets et le passage de chaque paquet devant les cavités de l'anode segmentée provoque une impulsion de champ électrique (Figure 1). Cet effet, découvert par Habann, et perfectionné par Hull, Alekseev et Malairov, a été à la base du développement du radar. L'énergie des électrons se transforme en partie en énergie électromagnétique. Un tuyau appelé « guide d'onde » conduit l'onde radar du magnétron jusqu'à l'antenne radar. Dans les années 40, des techniciens se sont rendus compte qu'il était possible de réchauffer leur café devant le cornet d'un guide d'onde. Le four à micro-ondes était inventé.

Otons le capot d'un four à micro-onde hors d'usage. A l'aide d'un tournevis cruciforme, enlevons le transformateur. Nous réserverons les autres pièces, notamment le magnétron, le moteur de ventilateur, la diode et le condensateur haute tension pour des montages ultérieurs. (NB : court-circuitez les

bornes du condensateur à l'aide d'une pince isolée avant de le démonter). Attention : un transformateur de four à micro-onde est un engin potentiellement mortel : il génère une tension de 2500 volts sous une forte intensité. Comme la tension est suffisante pour permettre au courant de traverser les tissus des vêtements ou les semelles des chaussures, la règle « une main dans la poche » qui est sensée préserver les expérimentateurs est ici totalement inopérante. Ne jamais effectuer de réglage lorsque les appareils sont branchés ! Respecter à la lettre les consignes de sécurité.

Si l'on relie les bornes du secondaire à des conducteurs que l'on fait se toucher brièvement, un arc s'établit et cet arc se maintient tant que les électrodes restent suffisamment proches (quelques centimètres). L'énergie calorifique dégagée par cet arc est considérable : plusieurs milliers de watts. Sur Internet, de nombreux auteurs conseillent de « ballaster » les TFMO avec un réchaud ou un fer à repasser en série avec le primaire. En pratique, on s'aperçoit que ce n'est pas indispensable : la résistance

du secondaire limite suffisamment le courant pour éviter que les fusibles ne sautent. Cependant, les bobinages chauffent très rapidement et il ne faut pas prolonger l'expérience.

Remarquons qu'un arc est équivalent à un court-circuit puisque la résistance d'un arc est négative : la tension aux bornes chute en même temps que l'intensité augmente.

ÉTINCELLES ÉLECTRIQUES

Normalement, l'air est un isolant électrique. Si le champ électrique augmente, les molécules d'argon s'ionisent et l'ionisation s'étend aux autres gaz de l'air. Le courant traverse brusquement l'espace entre les conducteurs électriques : c'est l'étincelle. La longueur de l'étincelle dépend de la tension et de la géométrie des conducteurs. Pour un conducteur pointu, le champ électrique est maximum sur les pointes (effet de pointe).

Pour les tensions plus élevées, il est impossible d'utiliser des pointes de même que tout câble de faible diamètre car les charges quittent spontanément les conducteurs sous forme d'*effluve* ou « vent électrique ». C'est « l'effet corona » (c'est le principe des moteurs ioniques atmosphériques des « lifters » que nous construirons dans un prochain numéro). Pour transporter la haute tension, on utilise alors des sphères et des conducteurs de diamètre convenable. Etant donné qu'il serait difficile de faire porter de larges tubes de cuivre par les pylônes EDF, les câbles du réseau THT sont triplés deux fois : trois conducteurs puisque le courant est triphasé, et chaque phase est conduite par des faisceaux de trois conducteurs séparés de 30 cm environ. Cet agacement simple réduit de façon considérable les pertes par effet corona, sans les faire disparaître totalement : le bruissement d'abeilles que l'on entend sous les lignes est dû à la fuite de l'électricité hors des conducteurs. C'est un vrai problème économique : 10% du courant d'EDF part ainsi dans l'atmosphère.

ARCS ÉLECTRIQUES

Si l'intensité qui passe dans l'étincelle est importante, les surfaces des conducteurs s'échauffent et libèrent une vapeur métallique ou carbonée conductrice : c'est le régime d'arc. Une fois que l'arc est établi, sa longueur ne dépend plus de la tension. Si une tension de 15 kV ne donne qu'une longueur d'étincelle d'environ 1 cm, l'arc peut se maintenir sur plusieurs mètres, par exemple si l'on touche les conducteurs d'un transformateur électrique à la sortie d'une centrale.

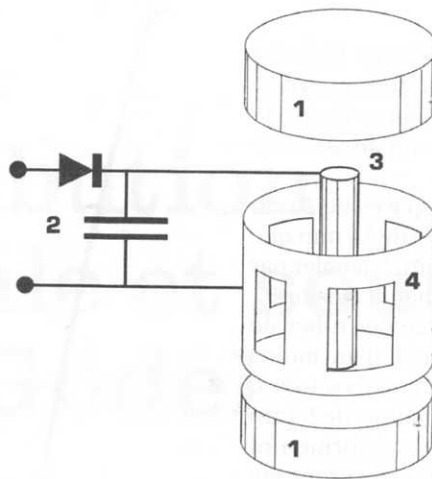


Figure 1

1. Aimant
2. Circuit doubleur de tension Villard
3. Cathode
4. Anode segmentée

Toute la puissance du générateur, de l'ordre de 100 mégawatts, se trouve alors dissipée dans l'air et dans le corps de l'imprudent, entraînant des conséquences funestes.

La longueur de l'étincelle croît de façon non linéaire avec la tension : pour fixer les idées, la tension de 400 000 volts du réseau de distribution THT provoque une étincelle vers la canne à pêche en fibre de carbone d'un pêcheur distrait qui l'approcherait à moins de 1 mètre. L'arc qui s'ensuit peut atteindre une dizaine de mètres de long.

Un seul Transformateur de Four à Micro-Ondes (TFMO) est capable de produire de beaux arcs, mais la tension est trop faible pour permettre l'amorçage dans l'air. Pour obtenir un arc qui s'amorce spontanément, il nous faut augmenter la tension. Nous y parviendrons en montant deux transformateurs en série. Attention :

les TFMO sont modérément isolés, notamment la partie du bobinage secondaire située contre la carcasse n'est pas isolée de celle-ci. En fait, une extrémité du secondaire est habituellement soudée au bâti du transformateur relié à la masse. Ce serait une grossière erreur de débrancher cette connexion : en effet, la haute tension retrouverait le passage vers la terre sous forme d'une étincelle jaillissant à partir de la base du secondaire, mettant notre appareil hors d'usage. Si on veut monter deux TFMO en série, il faut les relier de façon symétrique, comme sur la **Figure 2**. On

voit que les carcasses de tôle restent à la masse. On obtient 5000 volts aux bornes du dispositif. Un vieux faitout en aluminium ou en acier, d'environ 30 cm de diamètre, nous servira de cuve. Les deux TFMO seront vissés sur un solide disque de contreplaqué épais, percé de nombreux trous. Les vis ne doivent pas le traverser et les deux carcasses des transformateurs seront reliées par un fil de cuivre. On percera un trou près du bord pour faire passer le câble secteur et un trou plus gros pour faire passer un bouton-poussoir. On utilisera un câble secteur avec fil de terre et nous relierons à la terre à la fois la cuve et le couvercle (on fixera le fil de terre à l'aide de rivets ou bien de vis et de boulons). Une barrette de connexion sera fixée sur le disque de bois pour y relier les primaires des transformateurs. Les secondaires seront reliés soigneusement à l'aide de cosses à sertir et de fil coaxial d'antenne TV débarrassé de sa tresse externe (nous obtiendrons ainsi du fil haute tension fort acceptable). Tester avec précaution les TFMO : un arc doit jaillir entre leurs bornes, sinon il faut brancher le primaire à l'envers. Résistons à la tentation de brancher quatre TFMO en série : ce serait le

Figure 2

1. Enroulements primaires des transformateurs
2. Enroulements secondaires des transformateurs
3. Arc
4. Secteur 220 volts
5. Tubes en laiton

