

# 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 »<sup>1</sup>.

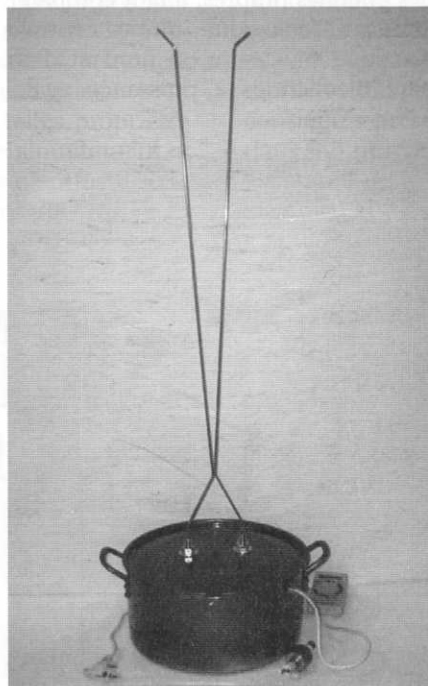
Appareil classique des amphithéâtres du début du XX<sup>e</sup> siècle, cette curiosité a sa place dans tous les laboratoires de physique de collège ou de lycée. Il a donné naissance aux parafoudres en forme de corne qui équipent les lignes EDF à moyenne tension de nos campagnes. Le principe en est simple : 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.

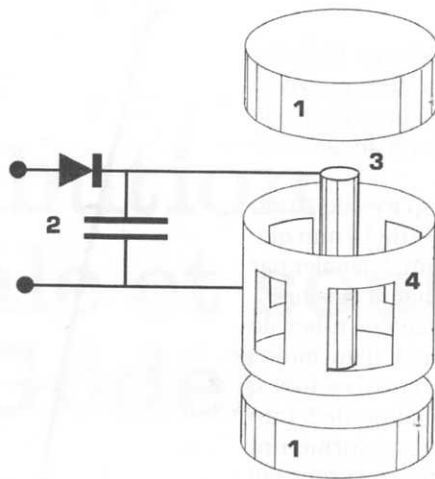
## ÉTINCELLES ÉLECTRIQUES

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.



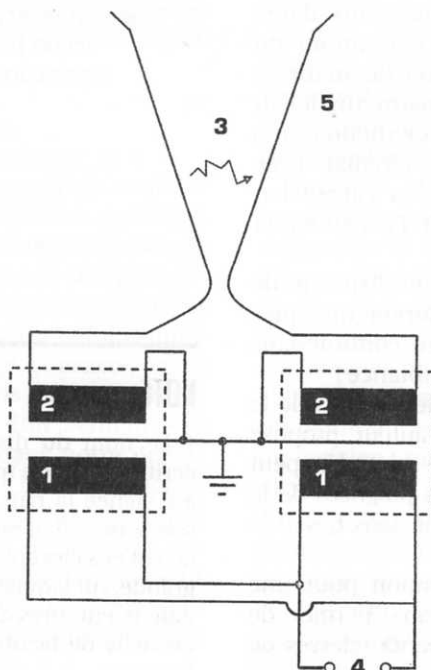
**Figure 1**

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

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

**Figure 2**

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



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 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 connection 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

court-circuit assuré. On fixera deux poignées en fil de fer (cintres) sur le disque en bois et on agrafera sur le pourtour du disque une feuille de carton fort d'environ 15 cm de haut qui assurera qu'aucune connexion ou qu'aucune tôle ne touche la paroi interne du récipient.

Le couvercle sera percé de deux trous espacés de 10 cm par lesquels on boulonnera des tiges filetées de 14 mm que l'on aura percées à l'aide d'un foret de 8 mm. (Signaler par une étiquette sur la cuve les dangers de la haute tension)

Dans les tiges filetées, on passera à force des tubes de plastique souple ou des durites dépassant d'au moins trois cm de chaque côté du couvercle. Dans ces tubes, seront collés deux tubes de cuivre ou de laiton de 5 mm de diamètre et d'environ 1 m de long qui formeront les montants de l'échelle de Jacob. Ces tubes auront été pliés avant le montage. Dans la partie des tubes de cuivre traversant le couvercle, on collera du fil de fer (cintres) pour leur donner plus de rigidité. Les tiges doivent se courber l'une vers l'autre puis s'éloigner régulièrement. Une pliure termine l'extrémité de chaque conducteur. La poignée centrale du couvercle sera ôtée et le trou servira à riveter un des fils de terre. Le couvercle sera percé et vissé à la cuve à l'aide de trois équerres en tôle (Figure 3).

À l'aide d'une pince, on ajustera la distance des tubes de façon qu'un espace d'environ 1 mm les sépare.

On branchera l'appareil. Si l'arc reste statique dans la région d'amorçage, ou bien si l'arc ne jaillit pas, on débranchera la prise secteur, et on écartera ou on rapprochera les électrodes en les tordant légèrement. Une fois l'appareil sous tension, l'arc s'amorce et les forces électromagnétiques le poussent vers le haut, tendant à élargir la surface du circuit.

Notre arc monte en vrombissant vers le haut de l'échelle de Jacob et arrive à un endroit où la distance entre les conducteurs est trop importante. Il s'éteint et un autre arc s'amorce de nouveau à la base et le cycle recommence. Si l'appareil est destiné à fonctionner devant des élèves, il faudra prévoir une protection qui empêchera tout contact avec les conducteurs sous tension : le couvercle d'une boîte à biscuits de 25 cm de diamètre sera riveté sur la cuve autour des tiges de laiton. Le fond de la boîte sera découpé à l'aide d'un ouvre-boîte et on collera autour un cylindre de rhodoïd transparent (magasins d'arts graphiques). Le haut du cylindre sera collé autour du couvercle d'une autre boîte à biscuits percée de multiples trous à l'aide d'un poinçon, ceci afin de permettre à l'air chaud de s'échapper. La base du cylindre de rhodoïd sera percée de quelques trous pour faciliter la circulation de l'air. On s'assurera que l'arc ne peut pas aller s'accrocher au couvercle supérieur, ce qui pourrait l'échauffer et enflammer le tube de rhodoïd.

Important : notre échelle de Jacob est un dispositif de démonstration destiné à fonctionner durant quelques minutes. Ne jamais le laisser branché en continu sans surveillance : ce n'est pas une lampe d'ambiance !

De façon à éviter que des élèves ne soient tentés de le brancher en l'absence du professeur, l'auteur propose d'utiliser une fiche secteur munie d'une anse. Un petit cadenas permettra de la fixer à l'une des poignées de la cuve. Ainsi on ne pourra brancher la fiche sans ouvrir le cadenas.

Construit avec des pièces de récupération pour une somme très modique, l'échelle de Jacob permet de démontrer l'existence de la force de Lorentz (classes de 1<sup>ère</sup>) et les propriétés de l'arc électrique (classes de 4<sup>e</sup>). ☐

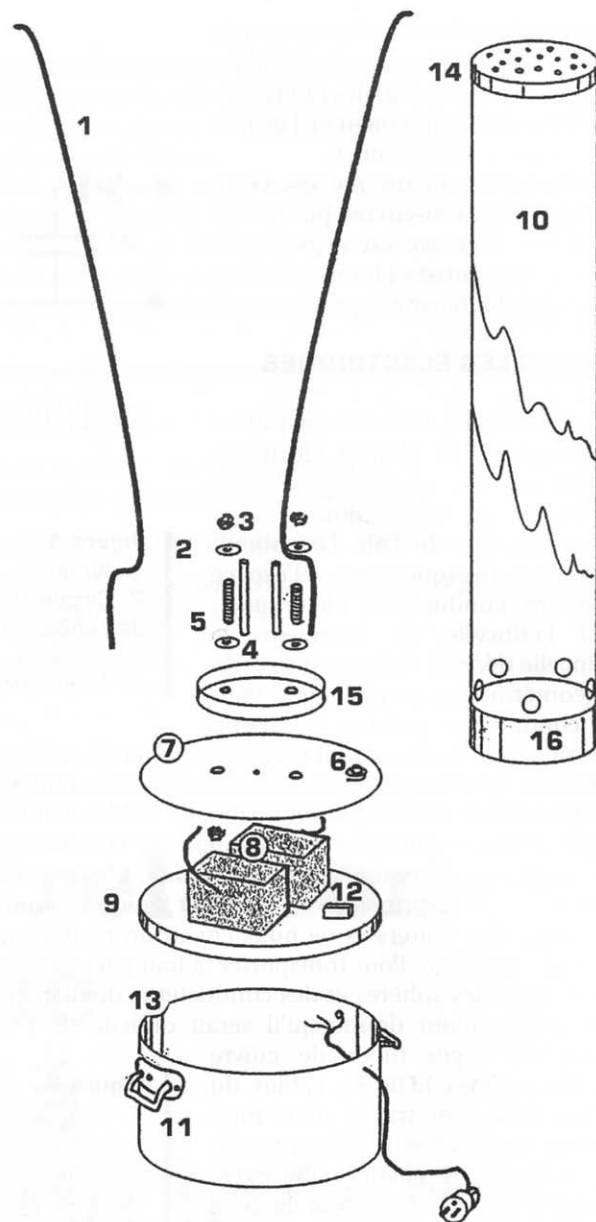


Figure 3

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1. Tubes en laiton   | 9. Disque en bois                   |
| 2. Tubes en plastique souple (tube pour pistolet à peinture ou durite) | 10. Cylindre de rhodoïd             |
| 3. Boulons   | 11. Poignées                        |
| 4. Rondelles   | 12. Barrette de connexion           |
| 5. Tige filetée creuse   | 13. Cuve                            |
| 6. Bouton poussoir   | 14. Couvercle criblé en fer-blanc   |
| 7. Couvercle   | 15. Couvercle de boîte en fer-blanc |
| 8. Transformateurs   | 16. Cylindre en fer-blanc           |

NOTE

1. Le nom du dispositif fait référence à un passage des écritures : Jacob revenait de Beershevah, lieu sacré où avait été signée la paix entre Abraham et les Philistins. Durant son sommeil, il reçut en songe l'image d'une échelle fichée au sol et s'élevant très haut dans le ciel, une échelle large et grande, sur laquelle des anges montaient et d'autres descendaient, entourés d'une grande lumière. Pour Saint Augustin, l'échelle de Jacob est le signe de l'ascension possible des hommes.