

# Errata

- **Page 2, §2** : Nicolas Tesla est bien un physicien serbe et non autrichien , né le 10 juillet 1856 à Smiljan, village aujourd'hui croate mais, à l'époque, sous la domination de l'empire autrichien. *(Merci à Félix pour sa correction)*

# La bobine Tesla artisanale.

## Table des matières.

### I Résumé-Introduction.

### II Rapport.

- 1) **Préliminaires.**
  - 1.1 **Alimentation**
  - 1.2 **Condensateur**
  - 1.3 **Éclateur**
  - 1.4 **Bobine primaire**
  - 1.5 **Bobine secondaire**
  
- 2) **Fonctionnement.**
  - 2.1 **Phase 1 : éclateur ouvert, charge du condensateur**
  - 2.2 **Phase 2 : éclateur fermé, décharge du condensateur**
  
- 3) **Expériences associées.**
  - 3.1 **Néon sans fil**
  - 3.2 **Arcs électriques**
  - 3.3 **Verre conducteur**
  
- 4) **Conclusions.**

### III Bibliographie et remerciements.

### IV Annexe.

## I Résumé-Introduction.

La bobine Tesla est un transformateur particulier qui permet d'atteindre des tensions extrêmement élevées, mais à une intensité très très faible, ce qui permet d'obtenir des effets spectaculaires sans danger.

Elle est une des 111 inventions brevetées par le physicien autrichien, mais né en Croatie, Nicolas Tesla. La première bobine date de 1890 et portait alors le nom de "transformateur de courant alternatif à haute fréquence" et fut rebaptisée "bobine Tesla" lors de l'exposition universelle de Chicago en 1893. Elle était alors utilisée pour faire des arcs électriques impressionnants de 35m, mais aussi pour transmettre de l'électricité sans fil. Une autre application imaginée par Tesla était de transmettre des informations vers n'importe quel endroit de la planète en utilisant la fréquence de résonance propre de la Terre. Il s'installa au Colorado pour faire ses expériences, mais les ondes émises en réponse dérangeant les habitants des environs, le projet fut abandonné après un dernier essai où un éclair de 40m se déchargea dans le sol, provoquant une déflagration qui s'entendit à 35km à la ronde et qui priva tous les alentours de courant. C'est là la plus grande décharge électrique jamais réalisée par un être humain.

Notre projet est naturellement bien plus modeste. En effet, il s'agissait simplement de reconstituer le montage de Tesla avec « les moyens du bord ».

À l'origine (octobre 2003) nous n'avions pas la moindre intention de présenter notre montage à une quelconque expo. Nous avons donc procédé par essai-erreur, de manière assez ludique. Notre inscription à Expo-Sciences nous a en fait servi de moteur en nous donnant un but à atteindre.

La première question que nous avons à traiter fut naturellement : est-il possible de construire une bobine de Tesla à la main quand on a 17ans ? Nous sommes donc partis à la chasse aux plans : bibliothèque municipale, livres et manuels scolaires ; nous avons écumé toutes les sources disponibles. Mais il fallut se rendre à l'évidence : la plupart des ouvrages ne proposaient qu'une brève explication du phénomène et ne présentaient aucun plan. Après une brève recherche sur Internet, nous avons vite compris que, si la bobine ne semble pas très populaire en Europe, elle fait véritablement l'objet d'une vénération aux USA. C'est pourquoi nous avons dû consulter en ligne des manuels anglophones qui fournissaient plus d'informations techniques. (par exemple l'article de Harold P. Strand dans le Science Experimenter de 1967).

À partir de ces éléments récoltés depuis de nombreuses sources nous avons imaginé notre propre montage et avons débuté la construction fin 2003. Chaque élément (excepté le transformateur de l'alimentation) a été construit à la main (et souvent en plusieurs exemplaires !). La période de tests a ensuite commencé et c'est alors que nous avons réalisé la difficulté de l'entreprise : certaines pièces (condensateur, électrode terminale) dépendaient de réglages minutieux tandis que d'autres (éclateurs et câbles) étaient soumis à de telles contraintes qu'ils brûlaient purement et simplement.

Mais nous avons persévéré et, malgré électrocutions et incendies, nous sommes fiers de présenter enfin un montage efficace.

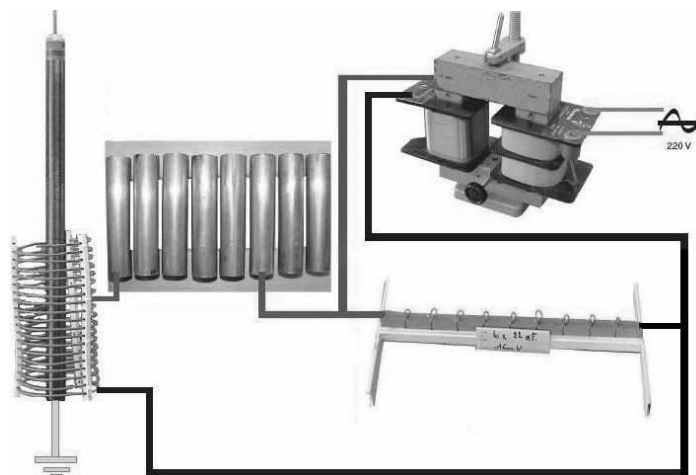
## II Rapport.

La bobine Tesla est sans doute une des inventions les plus populaires du physicien Nicolas Tesla. Il s'agit en fait d'un transformateur un peu particulier : en effet il permet d'atteindre des tensions colossales de l'ordre de plusieurs centaines de milliers de volts. Notre projet est naturellement bien plus modeste. En effet, il s'agit simplement de montrer qu'il est possible, à 17 ans, de reconstituer le montage de Tesla avec "les moyens du bord", et d'arriver à faire fonctionner celui-ci de manière tout à fait satisfaisante, sans toutefois égaler cet inventeur de génie qui créait des étincelles de plusieurs dizaines de mètres.

### 1) Préliminaires

Notre montage est composé d'un système d'alimentation, d'un condensateur, d'une bobine primaire et d'une bobine secondaire.

Les éléments sont connectés comme le montre le schéma ci dessous. La bobine secondaire est placée verticalement au centre de la bobine primaire.



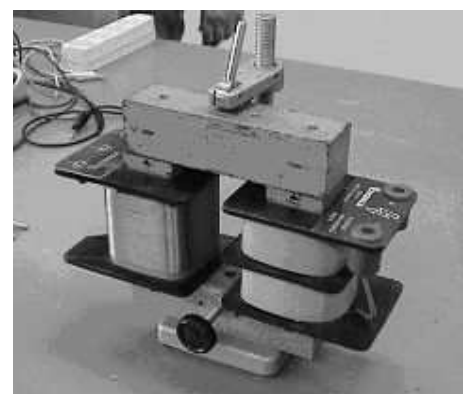
#### 1.1) Alimentation

Notre circuit doit être alimenté en haute tension, c'est pourquoi nous utilisons un transformateur de laboratoire composé d'un primaire de 500 spires et d'un secondaire de 23000 spires.

Entrée : 220V – 50Hz avec une intensité efficace de  $\pm 2.5A$

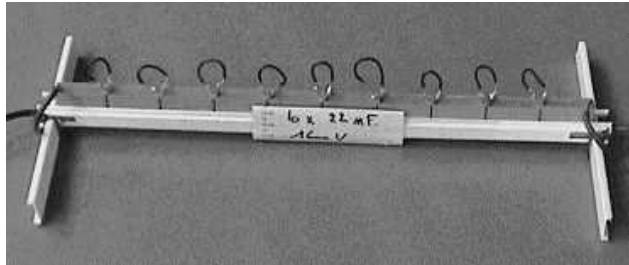
Sortie : 10 000V – 50Hz

(voir caractéristiques détaillées en annexe 9)



### 1.2) Condensateur

Notre condensateur est en fait constitué de 10 condensateurs Philips MMC 1600v/22nF montés en série. Nous avons choisi ce modèle en suivant les conseils de notre vendeur de composants électroniques qui nous a parlé de leur résistance au “stress électrique”. De plus il est recommandé par plusieurs constructeurs de bobines américains et allemands (par exemple Herbert Mehlhose). L’assemblage de condensateurs résiste donc à une tension de maximum 16 000V (ce qui nous laisse une marge de sécurité) et possède une capacité de  $2,2 \cdot 10^{-9} \text{F}$ .



### 1.3) Eclateur

L’éclateur est en quelque sorte un interrupteur qui ferme le circuit quand une étincelle le traverse. Il est composé d’une série de conducteurs isolés par quelques millimètres d’air. Pour que l’étincelle se produise, la tension aux bornes de l’éclateur doit être très élevée, environ 3000V par millimètre d’air à franchir, c’est pourquoi le circuit doit être alimenté en haute tension.



Il s’agit d’une des pièces qui nous a donné le plus de mal : en effet elle est soumise à des contraintes thermiques colossales. C’est pourquoi nos premiers prototypes n’ont pas survécu à la phase de tests.

Le premier modèle était composé de six rondelles d’acier soutenues par une tige de plastique et séparées par des lamelles isolantes (cartes magnétiques en plastique). Malheureusement les étincelles ont vite fait brûler le plastique ainsi que les isolants.

Au second essai nous avons conservé le même montage mais en remplaçant la tige de plastique par une barrette en bois : le résultat fut identique, après quelques minutes d’utilisation, le bois prit feu.

Enfin nous avons remplacé le bois par du verre. Mais le violent échauffement des rondelles eut vite fait de la faire éclater.

Ensuite, nous avons trouvé les plans d’un modèle qui semblait plus résistant : 6 tubes de cuivre d’environ 10cm de long et 2cm de diamètre étaient fixés sur la surface interne d’un tube en PVC de 15cm de diamètre. Le montage était refroidi par un puissant ventilateur placé dans le tube en PVC. Mais ce système ne

répondait pas à nos besoins. Il était délicat à fabriquer, son efficacité dépendait entièrement du refroidissement qui était très bruyant (moteur d'aspirateur) et surtout il ne permettait pas d'effectuer de réglages précis.

Nous avons donc imaginé puis construit le modèle actuel qui est composé de huit tubes en laiton vissés sur deux supports de bois pour former une sorte d'échelle.

Ce modèle original possède plusieurs avantages :

- Il résiste très bien aux contraintes thermiques auxquelles il est soumis.
- Il permet de faire varier la distance entre les tubes de 4 à 0mm en faisant simplement coulisser la structure en bois, même lorsque le circuit est sous tension. Cette caractéristique est un avantage majeur car elle permet de toujours garder un écartement optimal entre les tubes. Nous pouvons donc adapter le réglage du circuit en fonction de la variation des conditions au cours de l'expérience.

#### 1.4) Bobine primaire

Notre bobine primaire est composée de 19 spires de fil monobrin de 3 mm de diamètre bobiné autour d'un seau en plastique légèrement conique de 20cm de diamètre à la base et de 25cm de diamètre au sommet. (Voir mesures détaillées en annexe 12)

Nous n'utilisons que 7 spires mais le fait qu'il y en ait près de 20 nous permet d'adapter ce primaire aux différentes bobines secondaires que nous avons construites et qui réclament des réglages différents.

On peut estimer son inductance par la formule

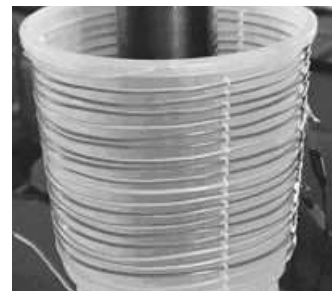
$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{7^2 \cdot 0,11^2 \pi}{0,07} \approx 3,3 \cdot 10^{-5} H$$

#### 1.5) Bobine secondaire

La bobine secondaire que nous utilisons est un long solénoïde fabriqué avec du fil émaillé de 0.2mm de diamètre et enroulé autour d'un tube en PVC de 5cm de diamètre sur une hauteur de 85cm.

La dernière spire du sommet de la bobine est connectée à l'électrode terminale. Il s'agit d'une grosse vis à bois enfoncée dans un bouchon en liège qui coiffe l'extrémité du tube. À la base du tube, la dernière spire est reliée à la terre via une longue chaîne d'acier.

Nous avons également fabriqué deux autres prototypes du même genre mais qui fonctionnaient moins bien.



## 2) Fonctionnement

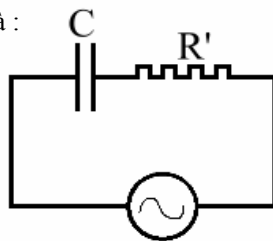
Lorsque l'on met le circuit sous tension, le transformateur se met à charger le condensateur. Quand le condensateur a accumulé une charge suffisante, une étincelle traverse l'éclateur, fermant le circuit comprenant la bobine primaire. Le condensateur se décharge alors en oscillant, créant un courant intense oscillant à haute fréquence. On obtient donc tout autour du primaire un important champ magnétique qui varie très vite. La bobine secondaire se trouve donc soumise à une variation de flux magnétique extrêmement rapide et très intense. Il en résulte aux bornes de cette bobine une tension induite gigantesque (de l'ordre de 500 000v !) qui produit des arcs spontanés au sommet de la bobine. (voir annexe 13)

Comme notre bobine consomme moins de 600W et que la tension aux bornes du secondaire est supérieure à un demi million de volts, l'intensité efficace qui circule dans celui-ci doit être inférieure à  $10^{-3}A$ , ceci étant vrai si on néglige les nombreuses pertes d'énergie un peu partout dans notre circuit ce qui ne présente absolument aucun danger.

Vu cette très faible intensité et le petit nombre de spires du primaire, l'induction magnétique du secondaire sur le primaire semble négligeable par rapport à la self induction du primaire. En effet, elle est plus de 1000 fois inférieure à cette valeur. (voir Annexe 4 – Induction magnétique primaire-secondaire)

### 2.1) Phase 1 : éclateur ouvert, charge du condensateur

Le circuit peut être assimilé à :



Calculons maintenant la charge maximale des condensateurs.

L'éclateur est réglé pour fermer le circuit le plus tard possible, c'est-à-dire quand la tension aux bornes du condensateur est maximale. Appelons  $U_c$  cette tension.

$$U_c = I_{\max} \frac{1}{C\omega}$$

$$I_{\max} = \frac{E_{\max}}{Z} = \frac{E_{\max}}{Z_{\text{int}} + Z_{\text{circuit}}}$$

$$Z_{\text{circuit}} = \left| R' - j \frac{1}{C\omega} \right|$$

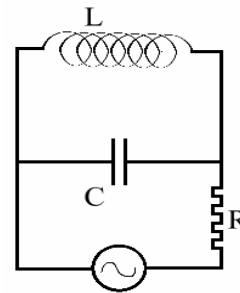
$$U_c = E_{\max} \frac{1}{Z_{\text{int}} + \left| R' - j \frac{1}{C\omega} \right|} \frac{1}{C\omega} \approx 10000\sqrt{2} \frac{1}{13600 + \left| 0.4 - j \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 100\pi} \right|} \frac{1}{2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 100\pi} \approx 14000V$$

On peut en déduire la charge alors stockée dans le condensateur :

$$q = Cu \quad Q_{\max} = 2,2 \cdot 10^{-9} \cdot 14000 \approx 3,1 \cdot 10^{-5} C$$

**2.2) Phase 2 : éclateur fermé, décharge du condensateur**

Le circuit peut alors être assimilé à :



Au moment où l'éclateur ferme le circuit, deux phénomènes se produisent dans le circuit :

- le condensateur se décharge à travers la bobine primaire à haute fréquence (circuit oscillant)
- le transformateur continue à fournir du courant à 50 Hz

Cas du transformateur

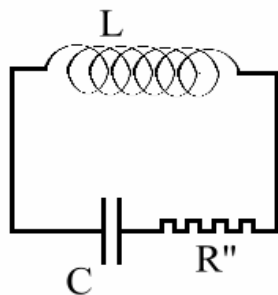
La résistance du circuit étant très faible par rapport à celle du transformateur, celui-ci est pratiquement en court-circuit, sa tension est donc quasi nulle. Nos mesures ont montré qu'il débite alors une intensité d'environ 0.1A.

La tension et l'intensité du transformateur n'influencent que très peu le condensateur et la bobine.

D'autre part, l'impédance interne du transformateur à la fréquence de fonctionnement de la bobine est gigantesque ( $1,57 \cdot 10^7 \Omega$  – voir annexe 9) par rapport à l'impédance de la boucle condensateur-bobine.

L'intensité qui va circuler dans celle-ci est donc très faible.

On peut donc négliger la présence du transformateur. Le circuit devient un circuit RLC série en régime libre :



Décharge du condensateur



Pour ce point, nous utiliserons comme référence Rappels d'électrocinétique, Sylvain Tisserant – ESIL "Décharge d'un condensateur à travers une bobine et une résistance" (voir annexe 5)

La résistance critique de notre circuit vaut  $R_C = 2\sqrt{\frac{L}{C}} = 2\sqrt{\frac{3,3 \cdot 10^{-5}}{2,2 \cdot 10^{-9}}} = 245\Omega$

Dans le cas présent, nous savons que le circuit est résonnant, mais ne pouvons rien dire sur la résistance de notre circuit. En effet, nous n'avons aucun moyen de savoir comment se comporte la résistance de l'éclateur lorsque celui-ci est traversé par l'étincelle. Par contre, nous avons mesuré la fréquence d'oscillation à l'aide d'un oscilloscope branché à une antenne : bien que très instable, elle varie entre 133000 à 300000 Hz en fonction de l'écartement de l'éclateur.

Nous allons tenter de calculer la résistance réelle que présente le circuit lors de cette décharge.

La pulsation naturelle  $\omega_0$  du circuit :  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

La pulsation réelle  $\omega$  varie entre  $2,66 \cdot 10^5 \pi$  et  $6 \cdot 10^5 \pi$

$$\text{Or } \varpi = \sqrt{\omega_r^2 - \frac{R^2}{2L}}$$

On en déduit que la résistance réelle R du circuit varie entre 149 et 168  $\Omega$  en fonction de l'écartement de l'éclateur.

Cependant, les meilleurs résultats sont observés à la fréquence de 133000 Hz, correspondant à l'ouverture maximale de l'éclateur, et ce même si la résistance est alors plus élevée. Dans les autres cas, la distance séparant les tubes étant plus faible, le circuit se ferme avant que le condensateur ne soit chargé à son maximum.

Nous conserverons donc la fréquence de 133000 Hz comme la valeur la plus correcte... L'intensité du courant parcourant le circuit est donnée par

$$i = \frac{\omega Q_{\max}}{\cos^2 \varphi} e^{-\alpha t} \sin(\omega t)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{R}{2L} \qquad \tan \varphi = -\frac{\alpha}{\omega}$$

L'intensité maximale traversant alors le circuit est de l'ordre de 40A.

Le courant va osciller dans la bobine jusqu'au moment où la tension aux bornes de l'éclateur ne soit plus suffisante pour fermer le circuit. On retourne alors à la phase 1, le condensateur se charge à nouveau et ainsi de suite.

### Cas du secondaire

L'intensité du primaire génère un puissant champ magnétique qui varie à la même fréquence que l'intensité, dans et autour de celui-ci. Ce champ magnétique traverse le secondaire, produisant un flux magnétique au travers des spires. Comme la bobine ne possède pas de noyaux de fer, les lignes de champ magnétique se dispersent, rendant impossible le calcul exact du flux. Nous écrivons donc la relation exprimant le flux magnétique avec un coefficient "k" inconnu représentant cette "perte" de lignes de champ.

$$\Phi = k \cdot b \cdot N_{\text{sec}} \cdot S_{\text{sec}} = k \cdot \mu_0 \mu_r \frac{N_{\text{pri}}}{l_{\text{pri}}} N_{\text{sec}} \cdot S_{\text{sec}} \cdot i$$

$\Phi$  est le flux magnétique traversant le secondaire,  $N_x$  le nombre de spires de la bobine concernée,  $S_x$  la surface d'une de ses spires,  $l_x$  sa hauteur,  $i_x$  l'intensité qui la traverse et  $\mu_0 \mu_r$  la perméabilité magnétique du milieu.

La tension au secondaire s'écrit donc sous la forme :

$$U_{\text{sec}} = \frac{d\phi}{dt} = k \cdot \mu_0 \mu_r \frac{N_{\text{pri}}}{l_{\text{pri}}} N_{\text{sec}} \cdot S_{\text{sec}} \frac{di}{dt}$$

Comme  $i$  dépend de l'impédance du primaire qui elle-même dépend du nombre de spires  $N_{\text{pri}}$  et de la hauteur  $l_{\text{pri}}$  de celui-ci, ces trois grandeurs sont liées. Il faut donc chercher à maximiser l'expression suivante

$$\frac{N_{\text{pri}}}{l_{\text{pri}}} \cdot \frac{di}{dt}$$

Nous avons cherché à maximiser ces résultats expérimentalement, par essai-erreur, plutôt que par calcul.

Si l'on se base uniquement sur cette formule, une fois le circuit réglé, on devrait pouvoir utiliser n'importe quelle bobine sans modifier les réglages... Cependant, lorsque l'on change de bobine, il faut changer les réglages pour trouver la fréquence qui correspond à la bobine. De plus, la moindre modification apportée au secondaire (remplacer la vis terminale contre un clou par exemple), nous oblige à recalibrer le circuit.

Enfin, le calcul du coefficient de perte  $k$  (voir annexe 6) montre que celui-ci vaut à peu près 2.5, ce qui est totalement impossible.

La simple induction ne suffit donc pas à expliquer le phénomène.

Nous avons trouvé une ébauche d'explication sur le site [www.teslacoil-france.net](http://www.teslacoil-france.net) (voir annexe 7) : l'énorme tension aux bornes de la bobine résulte de la formation d'ondes stationnaires à l'intérieur du secondaire.

Même si la vitesse de l'onde dans le cuivre ne se déplace pas exactement à la vitesse de la lumière dans le vide, cette théorie semble donner l'ordre de grandeur qui correspond aux données expérimentales.

La théorie prévoit :

$$l = \frac{c}{4\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 125 \cdot 10^3} = 600m$$

$l$  représente la longueur du fil du secondaire,  $c$  la vitesse de la lumière et  $\nu$  la fréquence d'oscillation du courant dans le primaire.

Or, sachant que le bobinage fait 85cm, que notre fil a un diamètre de 0.2mm et que le diamètre de la bobine est de 5cm, la longueur du fil est de :

$$\frac{850}{0,2} \cdot 0,05 \cdot \pi = 667m$$

Comme les spires ne sont sûrement pas parfaitement jointives, et qu'en plus il faut tenir compte de l'épaisseur du vernis dont elles sont recouvertes, ces deux valeurs correspondent, et la formation d'ondes stationnaires à l'intérieur de la bobine semble être une explication correcte.

### 3) Expériences associées

#### 3.1) Néon sans fil

Lorsqu'on approche un tube fluorescent tout à fait normal de la bobine (18W), on constate qu'il s'allume spontanément grâce au champ électrique oscillant.

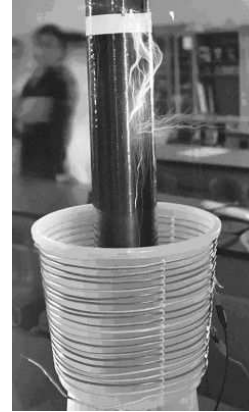


#### 3.2) Arcs électriques

La tension au sommet de la bobine provoque une aigrette spontanée au sommet et crée des arcs électriques avec tout objet à portée. L'air est un isolant, mais jusqu'à un certain point : lorsque le champ électrique dépasse 3000V/mm (valeur moyenne, elle dépend très fortement des conditions), l'air s'ionise et laisse passer le courant : il y a claquage de l'air. Les particules ionisées et excitées forment un plasma extrêmement instable. En se désexcitant, elles émettent de la lumière, qui nous permet de voir l'arc électrique, et produisent de l'ozone  $O_3$  à l'odeur caractéristique.

Estimer la longueur de l'étincelle est d'ailleurs le seul moyen que nous avons de connaître la tension au sommet de la bobine : avec un peu plus de 15cm d'arc, nous pouvons déduire que notre tension se situe aux environs de 500000V.

### 3.3) Verre conducteur



De même que l'air, le verre qui est un excellent isolant en temps normal, peut tout de même claquer si la tension est suffisante et laisser passer le courant. En répétant l'expérience, on constate que le verre se fragilise et devient presque poreux là où l'étincelle le traverse.

## 4) Conclusions.

Après près d'un an d'efforts, nous avons atteint notre but : nous avons reproduit le montage de Tesla avec les moyens du bords et sommes parvenus à le faire fonctionner de manière plus que satisfaisante.

Au cours de ce projet, notre ingéniosité et nos talents de bricoleurs ont d'abord été mis à rude épreuve pour parvenir à réaliser l'ensemble de nos pièces. L'éclateur fut sans conteste celle qui nous posa le plus de problèmes, et qui, au final, s'avère être la plus réussie, la plus personnelle, et la plus originale.

Après le bricolage, partant de nos bases en courants continus, nous avons découverts les courants alternatifs ainsi que les phénomènes qui les accompagnent, principalement la résonance.

Par nos expériences, impressionnantes au premier abord, nous avons vite découvert un autre aspect de l'électricité. Nous avons également appris où se trouve le danger et où il ne se trouve pas.

Les expériences ratées nous ont vite appris que la bobine de tesla est un instrument bien plus compliqué que ce que nous pensions au début du projet. Cela nous a poussé à faire des recherches plus approfondies pour finalement découvrir des théories qui dépassent totalement le niveau d'étudiants de 17 ans.

Pourtant, après quelques réflexions, mesures et calculs, nous sommes parvenus à en démentir certaines et en vérifier d'autres. La formation d'ondes stationnaires, augmentant les performances de façon spectaculaire, mais nécessitant des réglages très fins en est sans doute le plus bel exemple.

Malgré tout, un certain nombre de zones d'ombres subsistent, des aspects du fonctionnement que nous ne pouvons ni vérifier, ni contredire, car nous n'avons pas encore les connaissances scientifiques nécessaires à cet effet... L'avenir, proche ou lointain, nous apprendra sans aucun doute encore bon nombre de choses sur cette splendide invention sortie de l'esprit génial de Tesla.

### **III Bibliographie et remerciements.**

Cours de physique générale, 5<sup>e</sup> secondaire, H. Michels, 2003.

Miniature Tesla Coil , H.P. Strand, dans le Science Experimenter de 1967.

Physique, Eugène Hecht, De Boeck, 1999.

Éléments de physique – Tome 3 : électricité, A. Delaruelle & A-I. Claes, Wesmael-Charlier, 1981.

Physique, R. Faucher, Hatier, 1959

Leçons de Physique – série 2 vol. 2 et 3, M. Mathieu & R. Ghislain, Wesmael-Charlier, 1977 (Vol2), 1978(Vol3)

Rappels d'électrocinétique, Sylvain Tisserant – ESIL

Internet :

<http://www.teslacoil-france.net>

[http://home.wtal.de/herbs\\_teslapage/](http://home.wtal.de/herbs_teslapage/)

<http://j.webring.com/hub?ring=teslaring>

<http://www.teslacoil-france.net/>

Merci au Tesla Coil Ring (<http://j.webring.com/hub?ring=teslaring>) et à tous ses membres, et en particulier à Herbs ([http://home.wtal.de/herbs\\_teslapage/](http://home.wtal.de/herbs_teslapage/)) pour les conseils à propos du condensateur et au site <http://www.teslacoil-france.net> qui nous a permis de nous documenter sur ce splendide appareil qu'est la bobine Tesla.

Merci également à la société Bervaes qui nous a fourni, à prix réduit, le fil nécessaire au bobinage et à la société Lecluse qui nous a vendu le second transformateur haute tension.

Merci à Y Lion qui nous a aimablement prêté un vaste laboratoire.

Et surtout, merci à H. Michels qui nous a offert son aide, son matériel et son local pour la mise au point de notre bobine.

## IV Annexe.

### 1) Table de donnée

#### Transformateur :

Primaire : 500 spires

Secondaire :

23000 spires -- 12100Ω – 20H

A 50Hz,  $Z_{\text{int}} = |12100 + j20.100\pi| \approx 13600\Omega$

A 125000Hz,  $Z_{\text{int}} = |12100 + j20.250000\pi| = 1,57.10^7\Omega$

Entrée : 220 V - 2.5A --- Sortie : 10000 V – 0.05A

#### Condensateur :

10 x Philips MMC 1600v/22nF en série

$C=2,2.10^{-9}$ F

#### Bobine primaire

7 spires – diamètre : 22cm – hauteur : 7cm

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l} = 4.\pi.10^{-7} \frac{7^2.0,11^2 \pi}{0,07} \approx 3,3.10^{-5} H$$

#### Bobine secondaire

Diamètre : 5cm – hauteur : 85cm – diamètre du fil émaillé : 0.25mm

Nombre de spires : 850/0.25=3400

**Fréquence de fonctionnement** : de 133000 à 300000 Hz

**Tension produite** : 500000V (arcs de plus de 15cm)

### 2) Calcul de l'inductance d'une bobine et de la tension à ses bornes

Considérons une bobine de N spires chacune de surface S. La tension induite u dans la bobine est donnée par :

$$u = -\frac{d\Phi}{dt} \text{ où } \Phi \text{ est le flux magnétique traversant cette bobine.}$$

$$\Phi = B.N.S \text{ (pour une bobine)}$$

Or le champ magnétique à l'intérieur de la bobine vaut :  $B = \mu_0 \mu_r \frac{Ni}{l}$ , i étant l'intensité du courant qui la traverse.

$$\frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l} \frac{di}{dt}$$

$\mu_0 \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l}$  est une constante et est notée L. L est le coefficient de self-induction, aussi appelé

inductance, et s'exprime en henrys (H)

La tension aux bornes de la bobine est donc

$$u = -L \frac{di}{dt}$$

Supposons que i s'écrive sous la forme

$$i = I_{\max} \sin(\omega t)$$

$$u = -L \frac{di}{dt} = L\omega I_{\max} \cos(\omega t) = L\omega I_{\max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

### 3) Tension aux bornes d'un condensateur

Considérons un condensateur de capacité  $C$ . Notons  $u$  la tension à ses bornes. La charge  $q$  emmagasinée dans celui-ci est donnée par :

$$q = C.u$$

Supposons que  $i$  s'écrive sous la forme

$$i = I_{\max} \sin(\omega t)$$

$$i = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt} \Leftrightarrow u = \frac{1}{C} \int i \cdot dt = \frac{1}{C} \int I_{\max} \cdot \sin(\omega t) dt = \frac{1}{C\omega} I_{\max} (-\cos(\omega t)) = \frac{1}{C\omega} I_{\max} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

### 4) Induction magnétique primaire-secondaire

Montrons que l'induction magnétique du primaire due au secondaire est négligeable :

Le flux magnétique traversant le primaire et créé par le secondaire est donné par la formule :

$$\Phi_{\text{sec-pri}} = B_{\text{sec}} \cdot N_{\text{pri}} \cdot S_{\text{pri}} = \mu_0 \mu_r \frac{N_{\text{sec}} \cdot i_{\text{sec}}}{l_{\text{sec}}} \cdot N_{\text{pri}} \cdot S_{\text{pri}},$$

$N_x$  représente le nombre de spires de la bobine concernée,  $S_x$  la surface d'une de ses spires,  $l_x$  sa hauteur,  $i_x$

l'intensité qui la traverse et  $\mu_0 \mu_r$  la perméabilité magnétique du milieu.

Le flux magnétique produit par le primaire et traversant celui-ci est donnée par

$$\Phi_{\text{self}} = B_{\text{pri}} \cdot N_{\text{pri}} \cdot S_{\text{pri}} = \mu_0 \mu_r \frac{N_{\text{pri}} \cdot i_{\text{pri}}}{l_{\text{pri}}} \cdot N_{\text{pri}} \cdot S_{\text{pri}}$$

En comparant les termes  $\frac{N_{\text{sec}} \cdot i_{\text{sec}}}{l_{\text{sec}}}$  (ordre de grandeur :  $\frac{3000 \cdot 10^{-3}}{.85} < 10$  A/m) et  $\frac{N_{\text{pri}} \cdot i_{\text{pri}}}{l_{\text{pri}}}$  (ordre de grandeur :

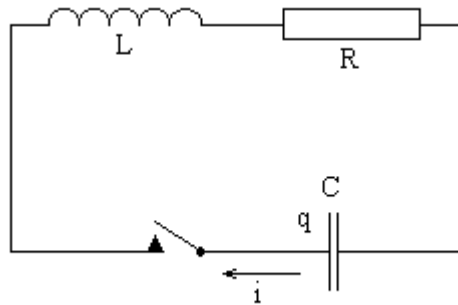
$\frac{7 \cdot 10^2}{0.24} > 10^3$  A/m), on constate que l'induction du primaire par le secondaire est plus de mille fois inférieure à la

self induction du celui-ci. Nous pouvons donc négliger les effets d'induction produits par le secondaire dans le primaire.

## 5) Référence théorique : Décharge d'un condensateur

Extrait de Rappels d'électrocinétique, Sylvain Tisserant – ESIL, partie 3 "Régimes transitoires", chapitre 5 "Décharge d'un condensateur à travers une bobine et une résistance"

Nous considérons le circuit RLC suivant :



Nous supposons qu'initialement le condensateur est chargé et qu'il ne circule aucun courant (interrupteur ouvert) :  $q(t=0) = q_0$  et  $i(t=0) = 0$ .

Avec notre choix d'orientation du sens positif pour le courant, nous avons :

$$\begin{cases} \frac{q(t)}{C} = L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) \\ i(t) = -\frac{dq(t)}{dt} \end{cases}$$

Ce qui nous donne l'équation différentielle suivante :

$$L C \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R C \frac{dq(t)}{dt} + q(t) = 0$$

Il s'agit d'une équation différentielle linéaire du second ordre. Pour résoudre cette équation il faut chercher les racines de l'équation caractéristique associée :

$$L C x^2 + R C x + 1 = 0$$

Celle-ci a pour discriminant :

$$\Delta = R^2 C^2 - 4 L C$$

La valeur de la résistance pour laquelle ce discriminant est nul est appelée résistance critique :

$$R_c = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Nous pouvons encore écrire le discriminant sous la forme :



$$\Delta = C^2 \left( R^2 - 4 \frac{L}{C} \right) = C^2 \left( R^2 - R_c^2 \right)$$

Les solutions de l'équation différentielle sont différentes selon le nombre et le type des racines de l'équation caractéristique.

**1<sup>er</sup> cas :  $R = R_c$**

[...]

**2<sup>ème</sup> cas :  $R > R_c$**

[...]

**3<sup>ème</sup> cas :  $R < R_c$**

L'équation caractéristique admet deux racines complexes conjuguées :

$$r_{\pm} = \frac{-R \pm j \sqrt{R_c^2 - R^2}}{2L}$$

Notons  $\alpha$  et  $\omega$  les valeurs absolues des parties réelle et imaginaire de ces racines :

$$r_{\pm} = -\alpha \pm j \omega$$

avec :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R}{2L} \\ \omega = \frac{\sqrt{R_c^2 - R^2}}{2L} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{\tau^2} - \alpha^2} \end{cases}$$

La solution générale de l'équation différentielle s'écrit alors :

$$q(t) = \lambda_+ e^{r_+ t} + \lambda_- e^{r_- t} = \lambda_+ e^{-\alpha t} e^{j\omega t} + \lambda_- e^{-\alpha t} e^{-j\omega t} = A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi)$$

Ce qui nous donne pour l'intensité :

$$i(t) = A e^{-\alpha t} [\alpha \cos(\omega t + \varphi) + \omega \sin(\omega t + \varphi)]$$

Les constantes A et  $\varphi$  sont déterminées par les conditions initiales :

$$q(t=0) = A \cos \varphi = q_0$$

$$i(t=0) = A (\alpha \cos \varphi + \omega \sin \varphi) = 0$$

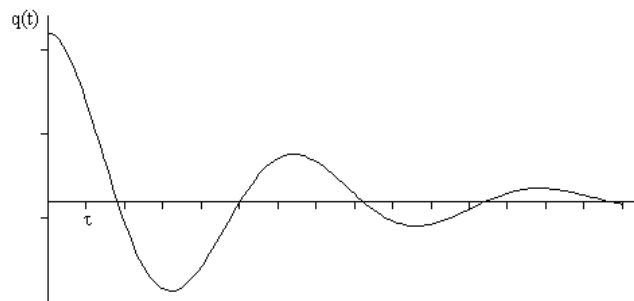
Ce qui nous donne :

$$\tan \varphi = -\frac{\alpha}{\omega} \quad \text{et} \quad A = \frac{q_0}{\cos \varphi}$$

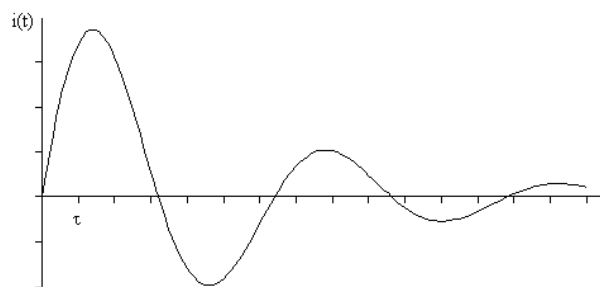
Soit en reportant dans les expressions de la charge  $q$  et du courant  $i$  :

$$\begin{cases} q(t) = \frac{q_0}{\cos \varphi} e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \\ i(t) = \frac{\omega q_0}{\cos^2 \varphi} e^{-\alpha t} \sin \omega t \end{cases}$$

Les figures suivantes montrent l'évolution temporelle de ces quantités. On observe des oscillations amorties.



$$(r = \sqrt{LC})$$



$$(r = \sqrt{LC})$$

## 6) Calcul de k

En introduisant toutes les données nécessaires dans le logiciel *Mathcad*, on obtient très simplement :

$$i(t) := \frac{\omega r \cdot Q}{\cos(\phi)^2} \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega r \cdot t)$$

$$U_{\text{sec}}(t) := k \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N_{\text{pri}}}{L_{\text{pri}}} \cdot N_{\text{sec}} \cdot S_{\text{sec}} \cdot \frac{d}{dt} i(t)$$

$$U_{\text{sec}}(0) = 500000 \text{ solve, } k \rightarrow 2.581206702923774808$$

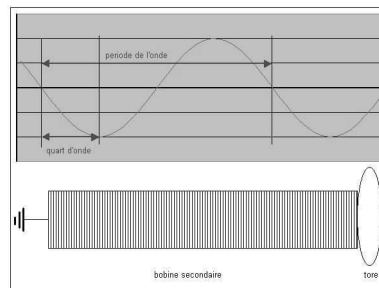
## 7) Référence théorique : Antenne quart d'onde

Source : [www.teslacoil-france.net](http://www.teslacoil-france.net)

### ANTENNE QUART D'ONDE

Voici un aspect important et souvent négligé du résonateur Tesla.

La bobine secondaire d'un résonateur Tesla (Tesla Coil) se comporte comme une antenne radiofréquence. Dans ces conditions les ondes électromagnétiques se déplacent dans l'antenne et sont réfléchies dans la bobine (ondes stationnaires). Comme le montre le schéma suivant :



On constate que le potentiel maximal sera acquis quand la longueur de bobinage sera égale à la distance parcourue par l'onde pendant un quart de l'onde. Connaissant la fréquence de résonance du résonateur Tesla (Tesla Coil) on peut en déduire la longueur (l):

Distance parcourue par l'onde pendant un quart d'onde :  $l = CT/4$  (C étant la vitesse de la lumière, et T la période)

Concrètement, pour vérifier si la bobine secondaire est quart d'onde, il suffit de connaître la longueur de fil et la fréquence à laquelle elle travaille.

Voici un exemple tiré de notre TC20 :

Il faut calculer le quart du temps de période de la fréquence considérée.

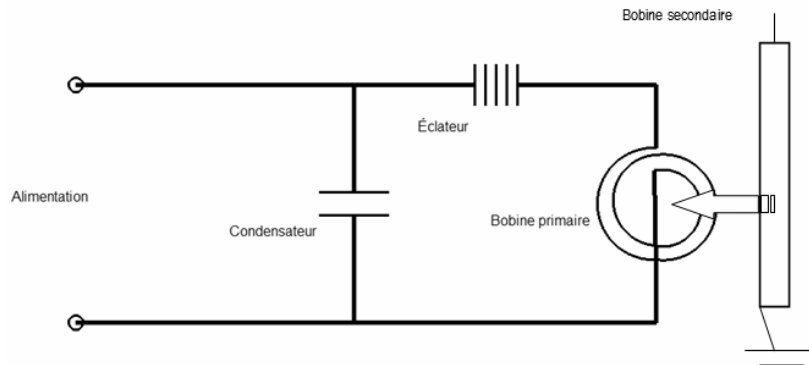
100kHz donne  $T = 10\mu\text{s}$  ( $f=1/T$ ) que l'on divise par 4  
Le quart de l'onde est donc de  $2,5\mu\text{s}$ .

Cette valeur est le temps qui permet de parcourir la distance totale de fil à la vitesse de la lumière.

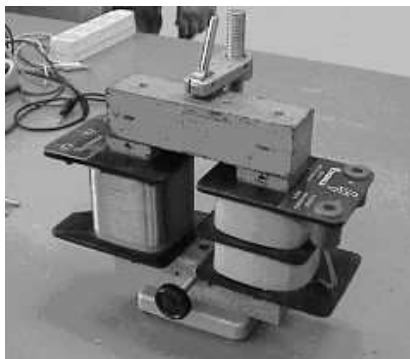
En  $2,5\mu\text{s}$  la lumière parcourt 750 mètres.

Cette valeur est presque notre longueur de fil sur la TC20.

### 8) Schéma du montage



### 9) Transformateur haute tension.



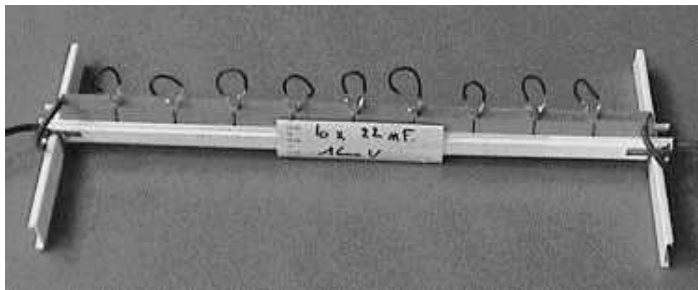
La résistance de la bobine secondaire vaut  $12100\Omega$  et son inductance  $20H$ .

Son impédance interne vaut donc  $Z_{int} = |R + jL\omega|$

$$\text{A } 50\text{Hz, } Z_{int} = |12100 + j20.100\pi| \approx 13600\Omega$$

$$\text{A } 125000\text{Hz, } Z_{int} = |12100 + j20.250000\pi| = 1,57.10^7\Omega$$

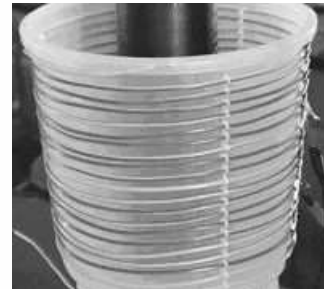
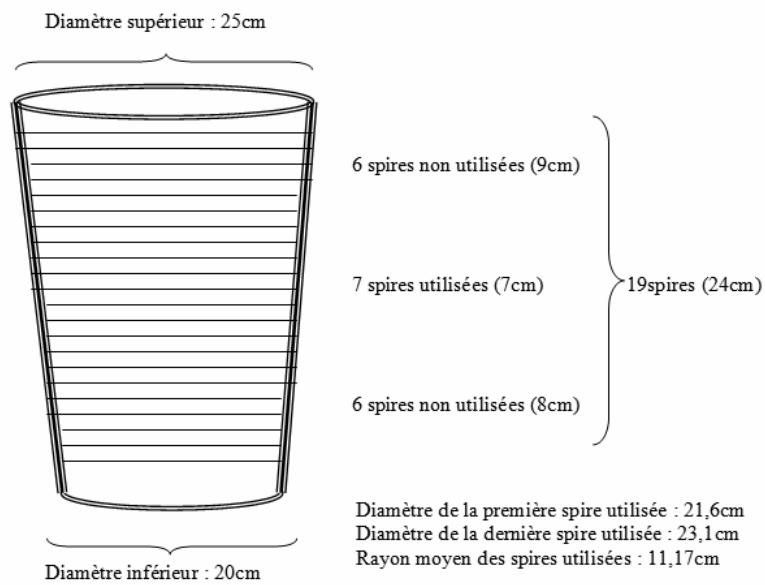
### 10) Condensateur.



### 11) Eclateur.



### 12) Bobine primaire.



### 13) Arcs au sommet de la bobine.

