

Etude des « Bobines de Tesla », modélisation, alimentation électronique et pédagogie associée

Luc Lasne

Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA
351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.

Contact email : lasne@creea.u-bordeaux.fr

Résumé : Cet article traite d'une approche expérimentale et théorique des « bobines de Tesla » (Tesla coil). Ce type de bobinage particulier constitue l'élément central d'un système à résonance utilisé pour produire un champ et des tensions électriques très importants. L'étude permet la construction d'un modèle et formalise quelles sont les grandeurs caractéristiques ainsi que leurs couplages. La réalisation du montage permet d'ioniser l'air à pression atmosphérique, d'allumer spontanément des tubes d'éclairage, de produire des effluves de type « plasma » ou encore des arcs électriques crépitants. L'aspect pédagogique est enfin détaillé, notamment à l'occasion d'interventions destinées à la jeunesse.

1. Généralités

Le terme de « bobine de Tesla » apparaît dans un ensemble d'inventions dues à Nikola Tesla (1856-1943) et destinées principalement à la production de champs électriques intenses et de phénomènes spectaculaires associés (*figure 1*). Si le plus souvent, la finalité de l'opération réside dans l'obtention d'importants arcs électriques (jusqu'à quelques dizaines de mètres de long) ou dans l'ionisation sans contact de tubes d'éclairage, ce type de circuit sert également de façon industrielle et dans la recherche à l'occasion d'essais diélectriques ou autres applications des hautes tensions.

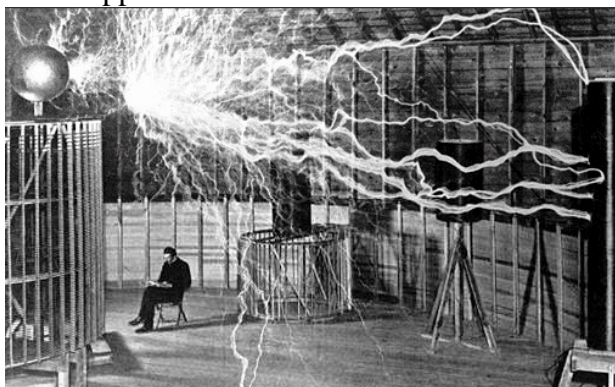


Fig 1 : Tesla dans son laboratoire - montage photo [1]

L'aspect fascinant des « bobines de Tesla » (« Tesla Coil » en Anglais) justifie aujourd'hui la présence d'un grand nombre de réalisations d'amateurs (éclairés...), qui prolifèrent essentiellement outre Atlantique. Pourtant, et malgré l'ancienneté des expériences de Tesla ou l'abondance des réalisations actuelles, il

persiste une sorte de « flou artistique » sur l'aspect théorique qui rend difficile la compréhension des notions importantes. L'objectif de cet article est ainsi autant de clarifier les modèles et leurs grandeurs que de présenter une réalisation « statique » de l'alimentation d'un tel dispositif, plus accessible à l'électrotechnicien moderne.

2. Principe de fonctionnement

Le principe général repose sur la résonance d'une sorte de transformateur élévateur constitué de deux bobines coaxiales sans noyau magnétique ; le fait que ce dernier soit à proscrire s'expliquant tout simplement par la volonté d'éviter l'amortissement que causeraient ses pertes fer. En substance, le très mauvais couplage dû à l'absence de circuit magnétique est spectaculairement compensé par la résonance de l'ensemble à une certaine fréquence et de très fortes tensions sont finalement obtenues au secondaire, tout simplement par « effet transformateur ».

Par conséquent, le « primaire » est simplement matérialisé par quelques spires enroulées à bonne distance d'un « secondaire » constitué, lui, de quelques milliers de tours, ce qui revient à un rapport de transformation important. Un éloignement progressif des deux bobinages est nécessaire afin d'éviter des amorçages entre ces deux circuits, ce qui justifie l'aspect souvent « conique » de l'enroulement primaire (voir *figure 2*).

3. Réalisation courante

3.1. Fonctionnement « en lâché »

Une grande majorité des réalisations actuelles utilise les décharges violentes et successives d'un condensateur dans le circuit primaire afin d'atteindre le régime de résonance. Ce régime « en lâché » se répercute efficacement au secondaire à condition d'un accord des fréquences de résonance et de différentes grandeurs caractéristiques.

La figure 2 fait ainsi apparaître la physionomie habituelle du système ainsi qu'un premier modèle électrique, relevé dans la littérature [2].

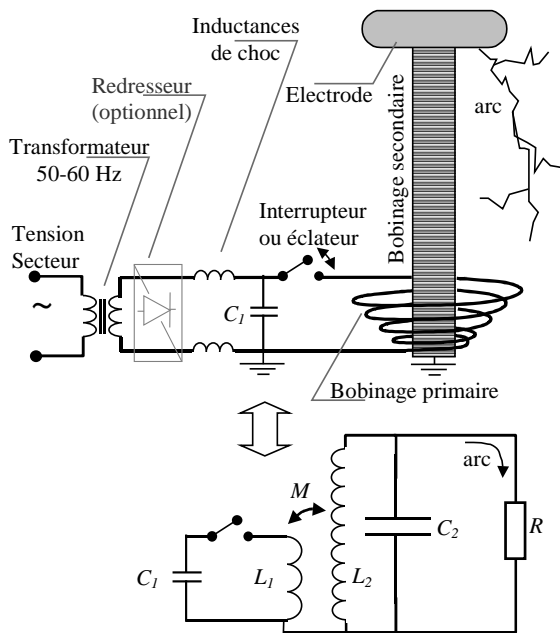


Fig 2 : Alimentation « en lâché » et modèle électrique

En terme de modélisation, le condensateur et la bobine primaire forment un couple $L-C$ résonant à la fréquence $f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1.C_1}}$. Le

secondaire est représenté par une inductance couplée par une mutuelle M au primaire, et associé à une résistance (qui modélise l'arc) et un condensateur. Ce dernier représente la capacité équivalente existant entre l'électrode et la masse : C_2 . Il existe ainsi une seconde fréquence de résonance à considérer : $f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2.C_2}}$. On montre alors [2] que, si

$f_2 = f_1$, la tension secondaire crête est maximale et égale à la tension de charge du condensateur multipliée par le rapport de transformation

$m = \sqrt{L_2/L_1}$. Le rôle de l'électrode posée sur la bobine est ainsi crucial par le fait qu'elle impose la valeur de la capacité C_2 . Une électrode présentant une grande surface est alors nécessaire afin de permettre à f_2 de n'être pas trop importante (inférieure à quelques 100 kHz) ; ceci autorisant des courants pas trop atténués par les réactances en série. Enfin on montre également que le coefficient de couplage ($k = M/\sqrt{L_1.L_2}$) modifie profondément l'allure des tensions obtenues et donc l'échange des puissances. En pratique, une fois le condensateur C_1 chargé, la fermeture du circuit est opérée soit par un éclateur autonome soit par des contacts à répétition souvent réalisés par un « éclateur rotatif ». Comme beaucoup de passionnés utilisent directement des alimentations haute tension (quelques kV) pour charger le condensateur, il ne reste alors que des moyens électromécaniques assez « violents » et donc « critiques » pour entretenir ce cycle de charge / décharge nécessaire.

3.2. Ordres de grandeur

Les résonateurs de Tesla rencontrés aujourd'hui présentent des dimensions souvent semblables ; les ordres de grandeur de leurs éléments caractéristiques sont donc assez similaires. Le tableau 1 regroupe ainsi un ensemble de valeurs typiques utiles par la suite.

	Formule utilisée	Dimensions et géométrie	Ordre de grandeur
L_2	$L = \frac{N_2^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{l}$	$l \sim 1$ à 2m $D \sim 10$ à 30cm $N_2 \sim 1000$	de 20 à 400mH
C_2	- simulation [3] -	Electrode torique , masse à 2m $\phi_{ext} \approx 50$ cm	de 0,01 à 0,5nF
f_2	$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2.C_2}}$	-	de 10 à 250kHz
L_1	$L = \frac{N_1^2 \cdot \mu_0 \cdot S_{moyen}}{l}$	$l \sim 5$ à 30cm $D \sim 20$ cm à 1m $N_1 \sim 5$	de 5 à 500μH
C_1	$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1.C_1}}$	-	de 0,5nF à 50μF
k	-	-	0,5 à 0,8

Tableau 1 : Ordres de grandeur

3.3. Simulations

La simulation du circuit équivalent permet de visualiser efficacement ce qui se passe lors de la décharge du condensateur C_1 . La *figure 3* représente ainsi plusieurs exemples de tensions secondaires en décharges uniques, réalisées avec L_1 , L_2 , C_2 fixes et C_1 ou k variables.

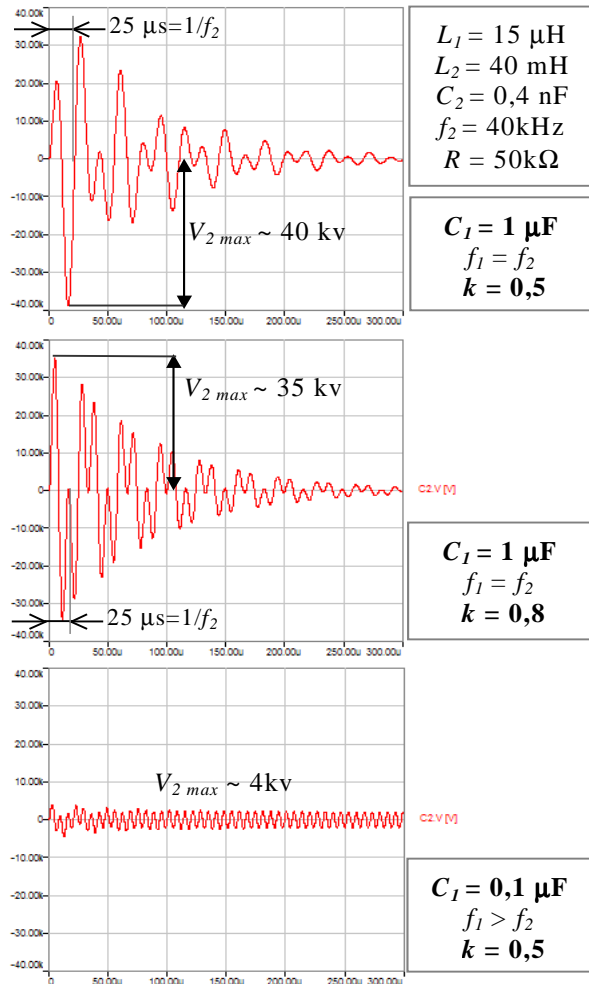


Fig 3 : Simulations sous Simplorer [4]

La tension de charge de C_1 étant égale à 1 kV, la tension maximale en sortie est ici de l'ordre de 40 kV à la conjonction des résonances. Cette valeur résulte du choix des grandeurs et notamment du rapport $m = \sqrt{L_2/L_1} \approx 50$; la valeur de 50 kV représentant ainsi (sur cet exemple) la tension maximale absolue que pourra atteindre le montage. L'utilisation d'un condensateur de valeur trop éloignée de cette conjonction (0,1 μF au lieu de 1 μF dans la simulation) conduit ainsi à une chute de la tension crête ;

chute qui reste néanmoins assez petite pour de faibles écarts des valeurs de la capacité. Enfin, la variation du coefficient de couplage k n'affecte pas trop la valeur de tension crête mais bien l'allure instantanée des grandeurs électriques.

Il est alors intéressant de retenir de ces simulations que la valeur du condensateur C_1 et le couplage des deux bobinages ne sont finalement pas des grandeurs vraiment critiques, à la différence du rapport des inductances $m = \sqrt{L_2/L_1}$ qui fixe globalement le rapport maximal des tensions.

3.4. Photographies

La *figure 4* présente une photographie à longue pose d'une « grande » bobine de Tesla fonctionnant par décharges répétées. Elle a été réalisée par un amateur suisse [5] qui se sert de sa bobine à des fins pédagogiques, souvent à l'occasion de manifestations scientifiques.



Fig 4 : Copyright Kurt Schraner [5], "Tesla-Coiler" Suisse

La tâche très lumineuse au pied de la bobine est causée par la couronne d'arcs de l'éclateur rotatif qui amorce la décharge du condensateur.

4. Réalisation électronique et établissement d'un modèle

4.1. Objectifs

A l'heure où l'électronique de puissance permet une gestion de plus en plus fine de la conversion d'énergie, il semble dommage de continuer à piloter les bobines de Tesla à l'aide d'éclateurs et d'organes électromécaniques soumis à des contraintes électriques et thermiques importantes. Parallèlement, il semble intéressant d'identifier un modèle plus familier du transformateur de Tesla, notamment pour mieux formaliser ce qui se produit lors de la résonance ou pour choisir les composants de façon prévisionnelle.

4.2. Montage électronique

Il est possible d'utiliser un montage basé sur des transistors de puissance en commutation pour hacher le courant qui circule dans la bobine primaire, et ce sur toute une plage de fréquence. La *figure 5* représente le montage utilisé, choisi en « pont complet », sachant qu'il est tout à fait possible de se limiter à un demi-pont (mais en ne disposant alors que la moitié de la tension disponible avec un pont complet).

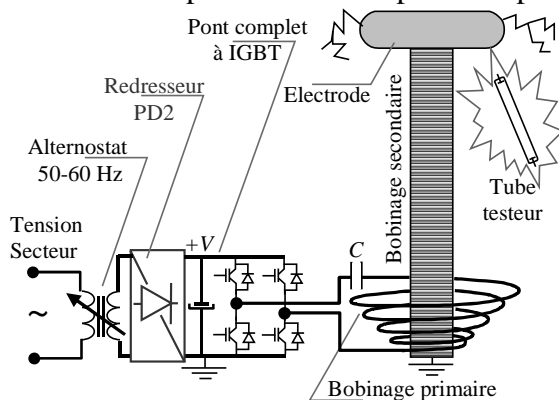


Fig 5 : Alimentation en créneaux à f réglable

L'alternostat d'entrée, associé au redresseur et à son condensateur de lissage, permet de produire la tension continue réglable +V (0 à 300 V environ) qui alimente le pont. La commande complémentaire des IGBT (commande « pleine onde » étant donnée la plage de fréquence à atteindre) permet de produire aux bornes de l'ensemble bobine-condensateur une tension carrée d'amplitude V et de fréquence réglable. Le fait de disposer un

petit tube fluorescent à proximité de la bobine permet par ailleurs de repérer visuellement les résonances (par son ionisation directe). Enfin le condensateur C, en série avec la bobine, permet d'éliminer la composante continue de courant due aux légères imprécisions du rapport cyclique contrôlant le découpage (en d'autres termes l'association $L-C$ réalise un filtre passe haut de courant).

4.3. Expérimentations et observations

Dès les premières expérimentations, plusieurs fréquences particulières font apparaître, dans des bandes passantes très étroites, des tensions spectaculairement importantes au niveau de l'électrode terminale de la bobine. En réalité pourtant, il n'existe qu'une seule fréquence de résonance (f_2) mais la tension carrée fournie par l'onduleur présente des harmoniques 3, 5, 7, etc. En d'autres termes, la particularité du découpage de la tension permet de faire résonner la bobine aux fréquences $f_2/3$, $f_2/5$, $f_2/7$, etc ; mais évidemment, plus la composante utilisée est de rang élevé, plus l'effet correspondant est faible.

Parallèlement, le relevé de quelques fréquences successives permet rapidement de trouver quelle est la véritable fréquence de résonance. En terme d'effets concrets, l'utilisation d'une tension d'entrée plus ou moins élevée permet, à la résonance, d'obtenir des manifestations diverses allant de l'ionisation de tubes à décharge classiques (Néons, etc) à la production d'arcs électriques (bruyants) pouvant atteindre des distances d'autant plus grandes que la tension est forte en amont.

Ceci étant noté, plusieurs faits se révèlent troublants :

- La modification de la valeur de la capacité C ne permet pas de faire varier la fréquence de résonance.
- Le nombre de spires primaires n'a également qu'une très faible influence sur f_2 .
- La géométrie de l'électrode secondaire, en revanche, influe très fortement sur la fréquence et sur l'efficacité du

phénomène. La présence de corps faisant « masse » dans son environnement influe même légèrement sur le calage de la fréquence.

Ces observations, et leur interprétation, ont ainsi conduit à l'élaboration d'un modèle équivalent à la bobine permettant d'expliquer les points délicats de l'expérimentation.

4.4. Modèle de la bobine et explications

Il est possible de considérer les deux bobinages couplés (par un coefficient de couplage non unitaire) comme un transformateur traditionnel présentant d'importantes inductances de fuites. L'utilisation de son schéma équivalent, classique en électrotechnique, conduit ainsi au circuit représenté sur la *figure 6*.

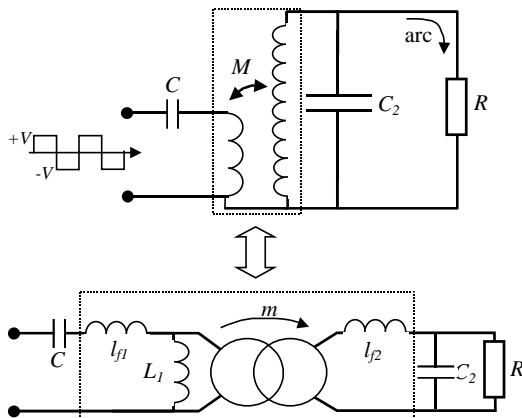


Fig 6 : Modélisation du transformateur équivalent

L'avantage de ce schéma est de faire apparaître un transformateur idéal dont les relations de passage d'impédances du secondaire vers le primaire sont bien connues [6]. La *figure 7* présente ainsi un schéma équivalent sur lequel les éléments réactifs sont ramenés au primaire.

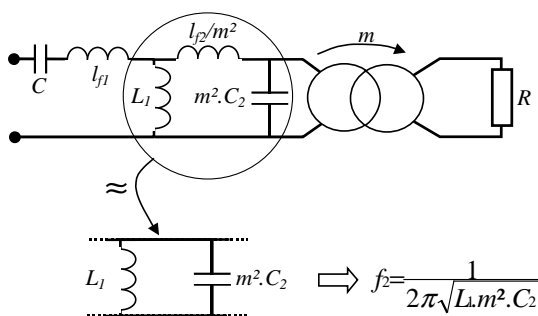


Fig 7 : Manipulation du modèle

En négligeant l'influence de l'inductance l_{f2}/m^2 (m étant très grand et en regard des valeurs du *tableau 1*), il apparaît un « circuit bouchon » dont la fréquence de résonance est fonction du produit $L_1.m^2$. En écrivant $L_1=N_1^2/\mathfrak{R}$ (\mathfrak{R} étant la réluctance du circuit magnétique primaire) et $m=N_2/N_1$, on remarque que le produit $L_1.m^2$ est indépendant de N_1 , le nombre de spires du primaire, ce qui valide les observations.

Enfin, la présence de ce « circuit bouchon » justifie le fait que la tension au primaire du transformateur idéal soit toujours « écroulée » par la présence de L_1 ou $m^2.C_2$; à l'exception de la fréquence de résonance pour laquelle ces deux composants se neutralisent. Dans ces conditions, représentées sur la *figure 8*, l'amplification de tension peut approcher la valeur $m=N_2/N_1$ (soit la même expression qu'en 3.3).

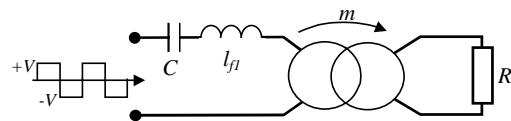


Fig 8 : Schéma équivalent à la résonance

Il est ainsi commode de retenir que le transformateur de Tesla se comporte comme un transformateur idéal à la résonance. Afin de produire des hautes tensions il est ainsi naturel d'utiliser un primaire constitué d'un nombre très réduit de spires (de 2 à 10 spires) dont le couplage n'a qu'un rôle mineur dans le comportement à vide.

Enfin, le rôle du condensateur C , utilisé pour supprimer la composante continue du courant, peut être interprété par la compensation d'énergie réactive due à l'inductance de fuite du bobinage primaire. Sa valeur peut même être calculée en fonction de cela.

4.5. Simulations et confrontation du modèle

Une fois le modèle ressenti, il est intéressant de le simuler pour vérifier sa conformité avec les phénomènes relevés. La *figure 9* regroupe ainsi les résultats de plusieurs simulations de la

tension secondaire réalisées avec des valeurs d'éléments correspondant aux premières simulations (figure 3); l'alimentation de la bobine et le modèle utilisés étant ici conformes au schéma de la figure 6.

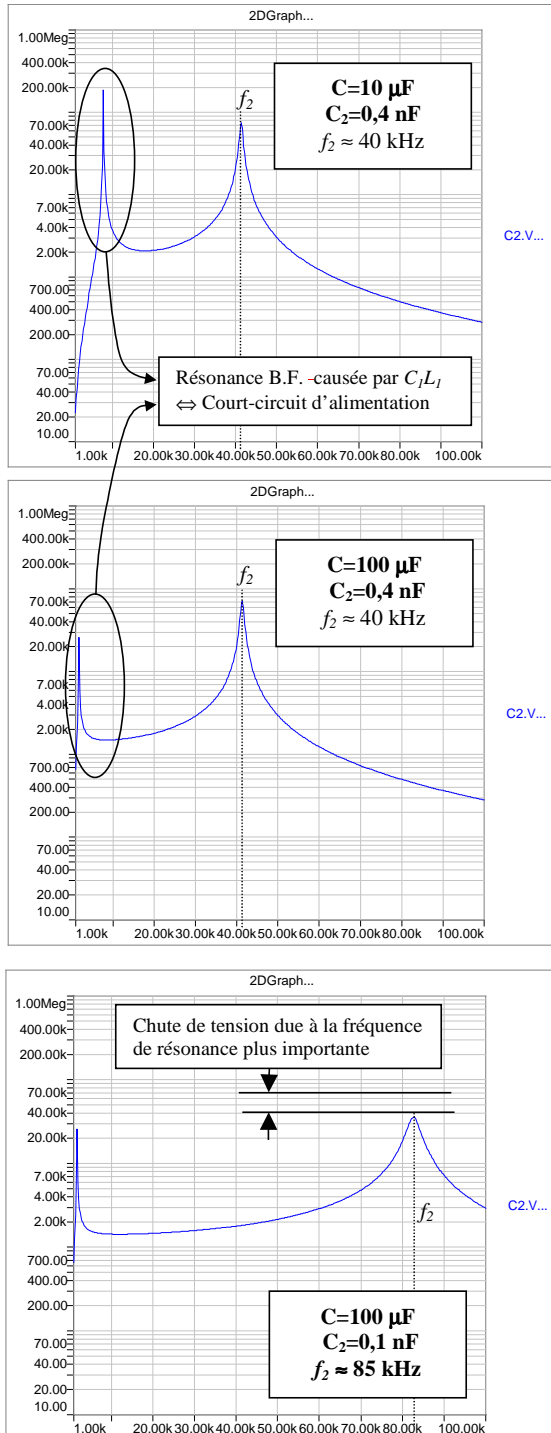


Fig 9 : Simulations sous Simplorer [4]

Ces graphes montrent bien la dépendance de la fréquence de résonance principale à la valeur de la capacité C_2 et son indépendance vis à vis de C_1 ; le pic « basse fréquence » représentant

pratiquement un court-circuit dû à la résonance de l'association C_1/L_1 . Par ailleurs, le fait que la fréquence principale soit plus ou moins importante influe sur l'impédance de sortie du montage, ou encore justifie une chute de tension plus ou moins importante en charge. Ces résultats, en accord avec l'expérimentation permettent donc de mieux comprendre l'interaction entre la géométrie de la bobine et la dynamique des grandeurs électriques.

4.6. Photographies et performances

La figure 10 présente une photographie de la partie haute de la bobine réalisée.

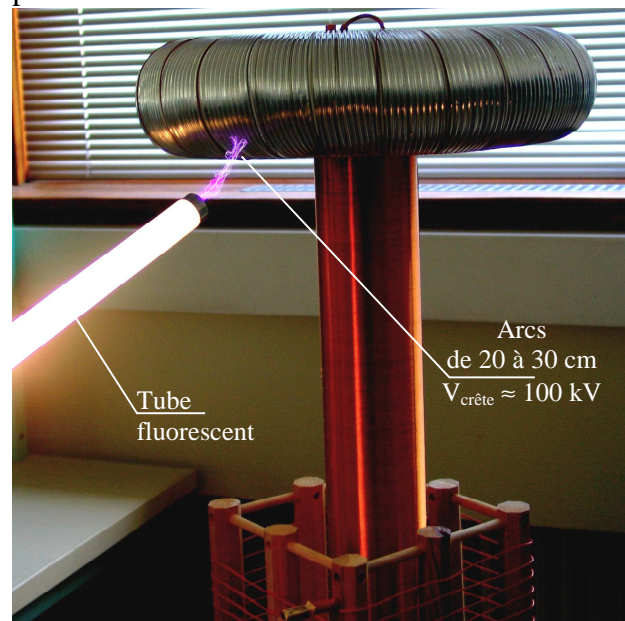


Fig 10 : Bobine et effluves attirées par un tube néon

Avec une tension continue d'alimentation du pont de seulement 250 à 300 V, un long tube fluorescent s'illumine spontanément à 2 mètres de l'électrode et des arcs de 10 à 30 cm apparaissent. Les « effluves violets » dues à l'ionisation de l'air autour des pointes (effet de pointe, effet couronne), comme le crépitement des arcs et leur lumière blanche sont très impressionnants. La tension d'alimentation est volontairement limitée à 300 V pour permettre à l'animateur de rester à une faible distance de la bobine et de brandir des objets sans être soumis à de désagréables « châtaignes ». Enfin, une « boule à plasma » s'illumine également à quelques 30 cm de l'électrode, ce qui est généralement très apprécié par l'auditoire.

5. Applications pédagogiques

5.1. Utilisation courante

Les applications pédagogiques de la bobine de Tesla sont particulièrement intéressantes dans le cadre de journées « portes ouvertes », de « salons de l'étudiant » ou même d'interventions en Lycée et Collège. Ce type de montage, imposant par la taille, le bruit, les lumières et les arcs qu'il produit, est l'occasion de montrer un ensemble de phénomènes fascinants et, surtout, de susciter l'intérêt de l'auditoire ; généralement à travers un grand nombre de questions.

Le système en lui-même étant le reflet d'une facette très particulière de l'EEA [7] et de la physique, la démonstration est également l'occasion d'ouvrir la discussion sur la diversité des matières et des recherches qui sont une réalité souvent mise de côté dans la présentation de l'enseignement supérieur.

5.2. « Chimie Physique Itinérante »

De façon concrète, la bobine est utilisée, entre autres, afin d'animer un atelier de l'association « Chimie Physique itinérante » [8]. Ce regroupement de chercheurs et d'enseignants organise des journées (2 jours consécutifs en général) dans des Lycées afin de présenter des applications scientifiques intéressantes, innovantes ou spectaculaires.

L'objectif principal est de sensibiliser les lycéens spectateurs aux sciences physiques, d'éveiller leur curiosité à travers des manipulations moins académiques que celles vécues en cours. De façon secondaire, il s'agit d'ouvrir des discussions directes et conviviales avec des enseignants du supérieur et des chercheurs.

En association avec les professeurs de physique des lycées participants, ce type de journée est l'occasion de « toucher » directement quelques centaines de futurs étudiants et de leur présenter une image des universités plus proche de « l'émerveillement scientifique » que de la « voie de garage »...

L'article de journal représenté sur la *figure 11* (Sud-Ouest du 13 Mars 2008) relate ainsi une de ces journées dans un lycée de Pessac (33). La bobine y fût utilisée au cours d'ateliers d'un quart d'heure environ par groupe. Les lycéens ont été apparemment très intéressés et leurs questions très diverses. On peut d'ailleurs noter que pour des *1^{ère}S* et *Terminale S*, beaucoup de questions ont concerné le trajet des courants, les phénomènes de pointe ou encore l'aspect « alternatif » de l'alimentation... ce qui ouvre le champ à des explications bien utiles à ce niveau.



Fig 11 : La bobine en « chimie physique itinérante »

5.3. Aspects pédagogiques avancés

La bobine de Tesla constitue une application tout à fait « hors normes » des domaines de l'EEA [7]. A titre d'exemple, le fait qu'un tube fluorescent s'allume spontanément, sans être branché à quoi que ce soit, à 2 mètres de la bobine, est un phénomène bien connu des gens qui travaillent dans les domaines de la haute tension. Cette manifestation de l'ionisation directe d'un gaz par le champ électrique environnant la bobine paraît pourtant très inhabituelle pour une grande majorité de personnes travaillant ou étudiant dans l'EEA.

C'est ainsi l'occasion pour eux de mieux « ressentir » la distribution du champ électrique, les effets de masse, de pointe, etc...

Le *tableau 2* présente ainsi, classés par thèmes de manière non exhaustive, quelques champs d'explications théoriques associés aux phénomènes courants de la bobine de Tesla.

Thèmes	Éléments théoriques associés
Effet transformateur	Couplage, coefficient de couplage, bande passante, transfo. haute tension, bobinages en haute tension, etc ...
Réactances	Comportement des impédances « discrètes » en basse fréquence (comme le primaire constitué de quelques spires)
Champ magnétique	Simulation de lignes de champ par éléments finis, calcul d'une inductance dans l'air, etc...
Champ électrique	Distribution radiale du champ électrique, concentration du champ, effet de pointe, ionisation, champ disruptif et claquage, etc...
Isolants / Conducteurs	Difficulté de classement des isolants et conducteurs en haute tension, méthodologie de tests et mesures de tensions de claquage et de contournement, etc...
Ionisation et arc électrique	Traceurs par bonds, canal ionisé, résistance négative, ionisation directe, phénomène d'influence, plasma, couleur de plasma, différenciation plasma / arc.
Résonance	Principe de résonance série et parallèle, bande passante, multi-résonance, résonance d'harmoniques, coefficient de surtension, etc...

Tableau 2 : Champs pédagogiques associés à la bobine

5.4. Sécurité électrique

La question de la sécurité électrique se pose naturellement lors de l'utilisation de la bobine puisqu'elle est destinée principalement à un public non averti en contact physique direct avec le champ électrique.

En réalité pourtant, et malgré les importantes tensions crêtes produites par le dispositif, son usage est quasiment inoffensif de par les raisons suivantes :

- La bobine est utilisée dans le cadre de tensions relativement « faibles » qui autorisent de présenter des objets dans

son champ proche et de « s'amuser » avec l'effet de pointe (ce qui n'est pas le cas avec toutes les manipulations de bobines de Tesla).

- L'impédance de sortie de la bobine étant très importante, les courants qui traversent le manipulateur lors de la formation d'arcs ont des valeurs très faibles, ce qui les rend souvent imperceptibles.
- Les fréquences de ces courants sont de l'ordre de 50 à 100 kHz ce qui est très largement supérieur aux plages de fréquences susceptibles d'entraîner une interaction avec le système nerveux.
- Dans le pire des cas, un contact entre le manipulateur et les objets environnants peut conduire à un petit choc électrique semblable à celui résultant d'une décharge d'électricité statique. L'effet thermique (petite brûlure due à l'arc) est dans ce cas là le plus douloureux.

Les précautions à prendre avant chaque démonstration consistent ainsi à éviter la manipulation aux personnes équipées de « pacemaker » ou autres prothèses électroniques, et à expliquer systématiquement la particularité du système permettant exceptionnellement de « jouer » avec l'électricité. La plupart du temps, une réflexion sur le risque électrique s'en suit et permet ainsi de rappeler à l'auditoire les dangers de l'électricité domestique et industrielle. La manipulation conduit également à sensibiliser les participants aux dangers particuliers de la haute tension, notamment au fait qu'il n'est pas nécessaire de toucher un conducteur pour pouvoir être électrocuté.

Références et bibliographie

- [1] Tesla, la passion d'inventer
Elisabeth Cheney - BELIN 1987
- [2] Haute tension, Traité d'électricité de l'EPFL TE vol XXII, édition originale
<http://ppur.epfl.ch/livres/2-88074-482-2.html>
- [3] Logiciel de calcul magnétostatique et électrostatique 2D « F.E.M.M. » - site Internet officiel : <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>
- [4] Logiciel Simplorer® v.7 Ansoft, gratuit au téléchargement en version étudiant
<http://www.ansoft.com/products/em/simplorer/>
- [5] « Tesla-Coiler » Suisse : Kurt Schraner,
<http://home.datacomm.ch>" ou encore :
<http://twfpowerelectronics.com/~kurt/index.html>
- [6] Electrotechnique, *luc Lasne* - DUNOD
2008 ISBN 9782100507207,
<http://www.dunod.com/pages/ouvrages/ficheouvrage.asp?id=50720>
- [7] EEA : Electronique, Electrotechnique, Automatique.
- [8] Association « Chimie Physique Itinérante ». Contact : Dr Philippe Cluzeau, CRPP Av A.Schweitzer – F – 33600 PESSAC.
email : cluzeau@crpp-bordeaux.cnrs.fr

Adresses et liens Internet

Il existe un grand nombre de sites et de *blogs* dédiés aux bobines de Tesla. La plupart de ces sites sont Anglophones et beaucoup de pages sont réalisées par des amateurs, parfois « éclairés » parfois non... Ci dessous quelques adresses assez sérieuses et Francophones, sachant qu'il suffit de chercher « bobine tesla » ou « tesla coil » sur un moteur de recherche pour trouver une avalanche de sites et de vidéos.

- Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Bobine_Tesla
- <http://www.f1ets.com/bobinetesla/index.htm#Fonctionnement>
- <http://tesla.nicoinn.be/site/tesla1.htm>
- <http://www.teslacoil-france.net/conception/conception.html>
- http://pagesperso-orange.fr/thomas.soft/tesla/older_versions/inventions/coil/index.htm