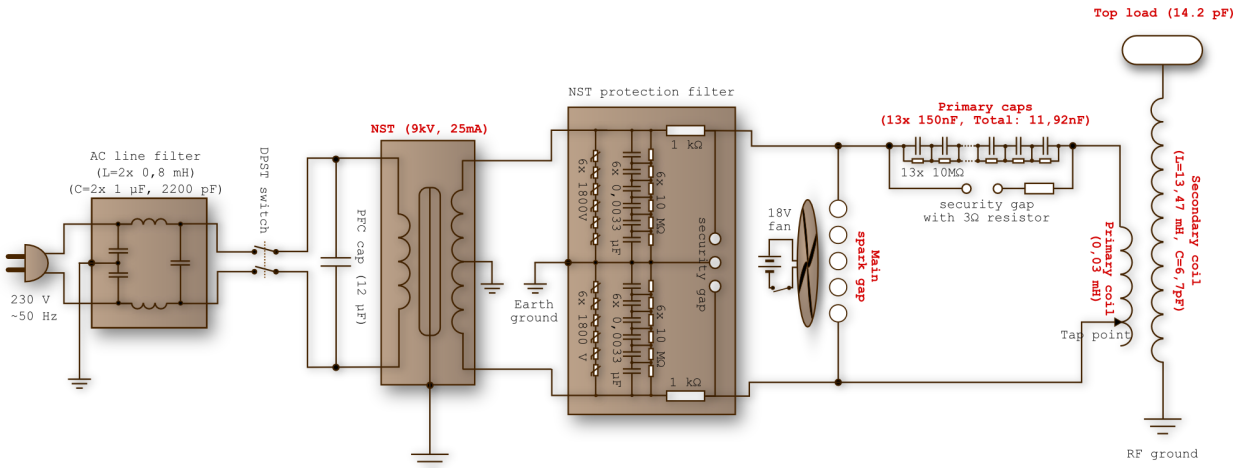


ZEUS - la bobine de Tesla

Christopher Gerekos, Département de physique.

L'appareil que l'on nomme de nos jours "bobine de Tesla" est probablement l'invention la plus célèbre de Nikola Tesla. Sur le brevet qu'il déposé en 1914 à l'*US Patent & Trademark Office*, elle portait le nom de "Appartus for transmitting electrical energy". Cet appareil est en réalité une des toutes premières tentatives d'antenne radio et une démonstration brillante des propriétés du courant alternatif.

Schéma électrique de Zeus



Théorie de fonctionnement

Les composants principaux de la bobine de Tesla sont : le transformateur, le circuit LC primaire et le circuit LC secondaire. Contrairement au transformateur conventionnel à induction magnétique, la bobine de Tesla utilise le phénomène de résonance dans un circuit LC comme moyen d'amplifier le voltage.

Nous sommes en présence de deux circuits LC présentant un couplage magnétique faible (généralement $0,05 \leq k \leq 0,2$) et dont les fréquences de résonances sont identiques :

$$f_0^{pri} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} = f_0^{sec}$$

Le transformateur commence par charger le condensateur primaire. Lorsque la différence de potentiel à ses bornes dépasse la tension de claquage de l'air, l'éclateur ferme le circuit primaire. On se retrouve ainsi avec un circuit LC dont le condensateur est pleinement chargé. Le courant va donc se mettre à osciller dans le circuit primaire, à une fréquence bien déterminée qu'est la fréquence de résonance du circuit. Ce dernier va induire des oscillations dans le circuit secondaire, puisqu'il est couplé à lui, par le phénomène d'induction magnétique. Le circuit primaire agit donc, au travers de la force électromotrice qu'elle engendre, comme un

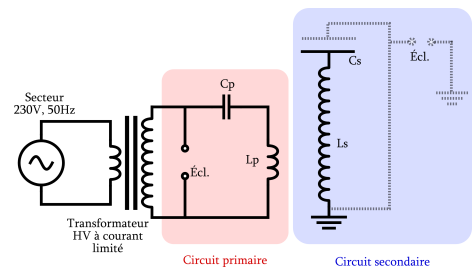


FIGURE 1 – Schéma de principe basique.

générateur de tension alternative en série sur le circuit secondaire. Comme ces deux circuits sont à résonance, et que le circuit LC secondaire est précisément entraîné à sa fréquence de résonance, celui-ci va amplifier le signal de façon terrifiante ; c'est ainsi que les éclairs sont générés. L'énergie est alors progressivement dissipée jusqu'à ce qu'un nouveau cycle puisse prendre place.

Les valeurs des auto-inductances et des capacités des deux circuits sont choisies de telle sorte que c'est la tension qui s'amplifie et le courant qui diminue. On peut montrer que le gain en voltage, pris comme le rapport du voltage initial V_{in} et du voltage final V_{out} peut s'exprimer en termes des auto-inductances des deux circuits selon :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \sqrt{\frac{L_s}{L_p}}$$

En réalité, le cycle de transfert de l'énergie entre le primaire et le secondaire est plus compliqué que ce qui a été énoncé. En raison du faible couplage entre les inducteurs primaire et secondaire, celui-ci se fait en plusieurs "rebonds" tels qu'ils sont représentés sur la figure 2. L'intensité de chaque ventre diminue à chaque rebond car l'énergie disponible diminue exponentiellement : celle-ci a été dissipée en chaleur dans les résistances internes des composants et dans les éclairs produits à l'extrémité du circuit secondaire. Ceux-ci sont cependant cruciaux pour le bon fonctionnement de la bobine de Tesla car les éclairs sont générés en plusieurs fois et grandissent à chaque rebond.

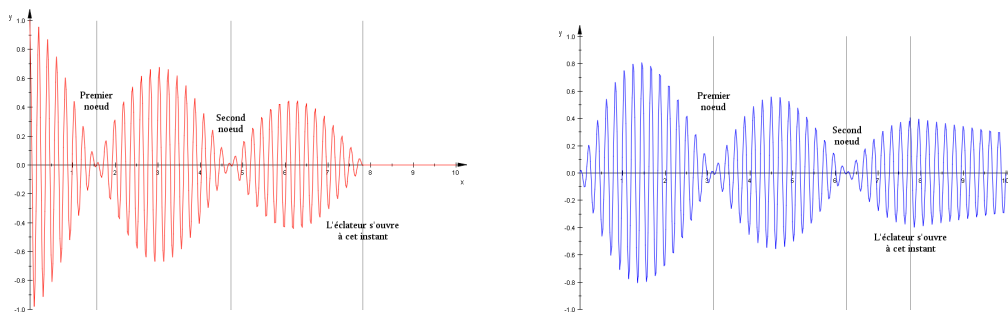


FIGURE 2 – Graphique de la tension en fonction du temps dans le circuit primaire (rouge) et dans le circuit secondaire (bleu). Ici est représenté un cycle à 3 rebonds.

Il n'est pas possible de mesurer simplement les caractéristiques du courant que constituent les éclairs. J'ai pour cela recouru à un programmeⁱ, qui simule le comportement du circuit à l'intérieur de la bobine secondaire :

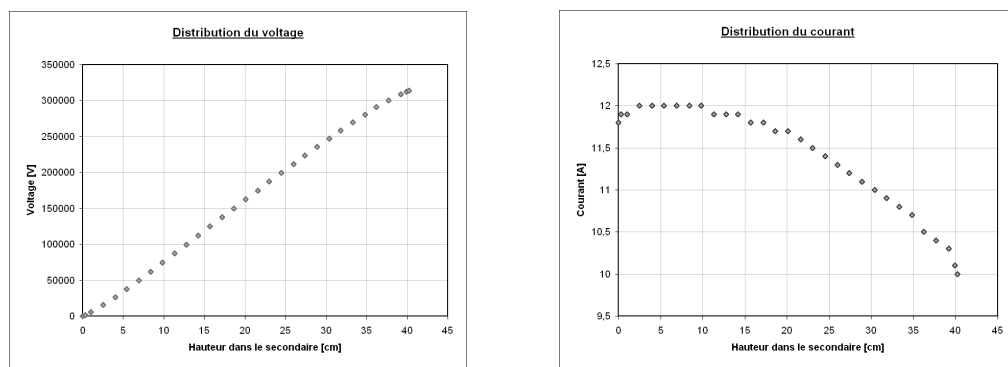


FIGURE 3 – Graphiques représentant la tension et le courant comme fonction de la hauteur dans la bobine secondaire. On voit qu'à l'extrémité de cette bobine, le courant est de 10 A, et la tension de ... 314 000 Volts.

i. JAVATC, par Barton B. Anderson, <http://www.classictesla.com/java/javatc/javatc.html>.

Chapitre 1

Résistance

La résistance est un composant électronique qui permet d'augmenter la résistanceⁱ (propriété d'un matériau à ralentir le passage d'un courant électrique) d'un circuit.



FIGURE 1.1 – Schéma d'une résistance dans un circuit

Les résistances peuvent être de plusieurs types, citons les plus communes :

- résistances de puissance : utilisées pour produire de la chaleur selon la loi $P = RI^2$, où P est la puissance, R la résistance et I l'intensité du courant (principe du chauffage électrique)
- résistances fixes : utilisées dans des montages électroniques pour obtenir des potentiels ou courants déterminés en certains endroits du circuit
- résistances variables : permettent d'ajuster un courant (le rhéostat d'une lampe à luminosité variable par exemple)



FIGURE 1.2 – Deux types de résistances utilisées dans la bobine de Tesla

i. Pour en revenir à la résistance dans le sens propriété physique : cette notion peut être comparée à un exemple de la vie de tous les jours. Lorsque de l'eau circule dans un tuyau malléable (ex. : un tuyau d'arrosage), l'écrasement de ce tuyau provoquera une diminution du débit. Cela correspond à la résistance qui augmente. Le cas limite est lorsque l'eau ne circule plus, la résistance est infinie.

Chapitre 2

Condensateur

Un condensateur est un composant électronique ou électrique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices (électrodes) en influence totale et séparées par un isolant électrique (diélectrique). Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques opposées sur ses armatures. Un rôle comparable, dans l'immédiat, à celui d'une batterie.

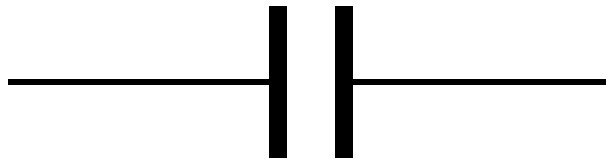


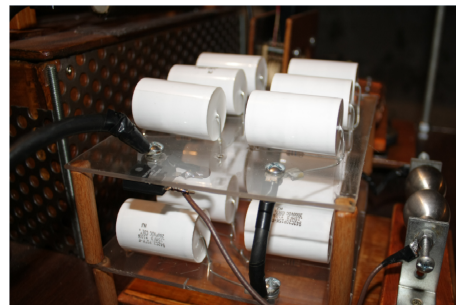
FIGURE 2.1 – Schéma d'un condensateur

Le rôle d'un condensateur est multiple :

- stabiliser une alimentation électrique
- traiter des signaux périodiques
- séparer le courant alternatif du courant continu, ce dernier étant bloqué par le condensateur
- stocker de l'énergie, auquel cas on parle de supercondensateur



(a) Condensateur à plaques "artisanal"



(b) Condensateurs utilisés pour la Tesla

FIGURE 2.2 – Deux types de condensateurs pouvant tous les deux être utilisés sur la Tesla

Chapitre 3

Bobine ou auto-inductance

Une bobine est un composant fréquent électronique. Une bobine est constituée d'un bobinage ou enroulement d'un fil conducteur.



FIGURE 3.1 – Schéma d'une bobine

Son rôle est également multiple, citons notamment :

- créer un filtre pour une fréquence ou une bande de fréquences particulière
- assurer l'élimination des parasites d'une alimentation électrique ou d'un signal analogique
- raccourcir une antenne (la bobine joue le rôle d'amplificateur de signal)
- stocker de l'énergie du champ magnétique

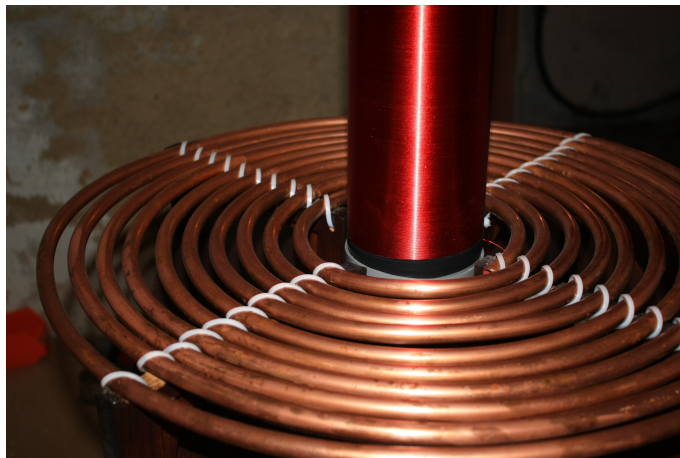


FIGURE 3.2 – Inductances du circuit primaire (tuyau en cuivre) et du secondaire (fil rouge) de la Tesla

Chapitre 4

Circuit RLC

Un circuit RLC est un circuit linéaire contenant une résistance électrique, une inductance et un condensateur.

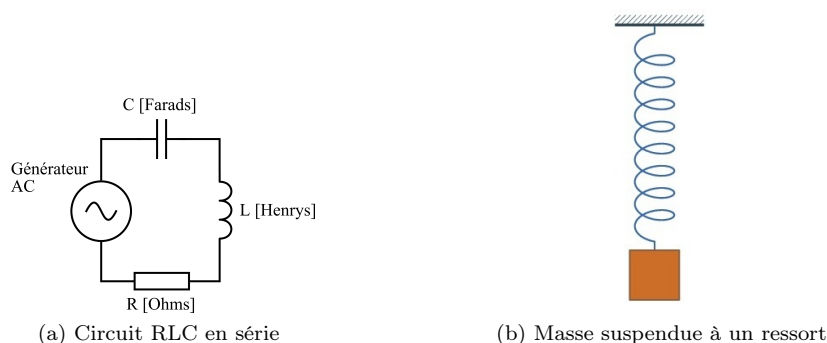


FIGURE 4.1 – Analogie entre un circuit RLC et une masse reliée à un ressort

Le comportement d'un circuit RLC est généralement décrit par une équation différentielle du second ordre.

Les circuits RLC sont généralement utilisés pour réaliser des filtres de fréquence ou des transformateurs d'impédance. Ces circuits peuvent alors comporter plusieurs inductances et plusieurs condensateurs : on parle alors de "réseau LC".

Une analogie utile pour comprendre le fonctionnement d'un circuit RLC est le mouvement d'une masse attachée à un ressort : les caractéristiques de notre circuit RLC sont l'inductance L , la résistance R , la capacité C . q est une charge électrique et l'intensité est définie par $\frac{dq}{dt} = i$.

Ceci peut donc être comparé à une masse m attachée à un ressort de constante de raideur k . λ est le coefficient de frottement et x , $\frac{dx}{dt}$, $\frac{d^2x}{dt^2}$ désignent respectivement la distance (x), la vitesse (v) et l'accélération (a) de la masse.

Circuit RLC	Masse soumise à un ressort
q	x
i	v
$\frac{dq}{dt}$	a
L	m
R	λ
$\frac{1}{C}$	k
$U = RI$ (loi d'Ohm)	$F_f = \lambda v$ (force de frottement)

Chapitre 5

Transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

L'équation fondamentale d'un transformateur parfait est : $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$ où U est la tension (1 du primaire, 2 du secondaire) et N le nombre de spires. Cela signifie que la tension dans le circuit secondaire peut être choisie en changeant le rapport du nombre de spires.

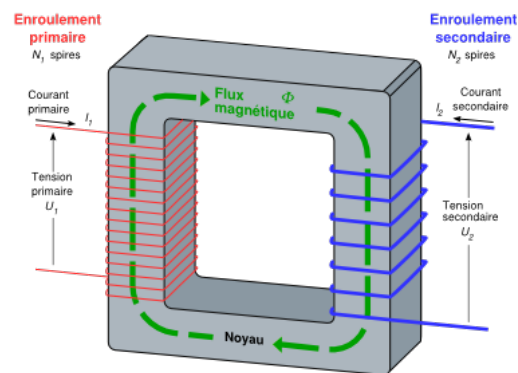


FIGURE 5.1 – Transformateur à noyau de fer

Les transformateurs se rencontrent au quotidien, cela va du chargeur de batterie de téléphone portable aux transformateurs hautes tensions situées près des centrales et qui facilitent l'acheminement de l'électricité dans les villes.



FIGURE 5.2 – Transformateur professionnel de haute tension

Chapitre 6

Courant électrique

Un courant électrique est un déplacement d'ensemble de porteurs de charge électrique, généralement des électrons, au sein d'un matériau conducteur. Ces déplacements sont imposés par l'action de la force électromagnétique, dont l'interaction avec la matière est le fondement de l'électricité.



FIGURE 6.1 – Courant électrique, observable dans l'air

Il existe deux types de courants électriques :

- Le courant continu (DC) : Le courant continu est un courant électrique indépendant du temps. C'est globalement un courant électrique unidirectionnel : le courant circule continuellement dans le même sens. Les courants continus sont produits par des générateurs ou des dispositifs délivrant des tensions également continues. L'exemple le plus connu est la pile alcaline.

- Le courant alternatif (AC) : Le courant alternatif est un courant électrique qui change de sens, il est tantôt positif, tantôt négatif. Ce courant alternatif est dit périodique s'il change régulièrement et périodiquement de sens. Un courant alternatif périodique est caractérisé par sa fréquence, mesurée en hertz (Hz). C'est le nombre d'aller-retours qu'effectue le courant électrique en une seconde. Un courant alternatif périodique de 50 Hz effectue 50 aller-retours par seconde, c'est-à-dire qu'il change 100 fois (50 allers et 50 retours) de sens par seconde.



FIGURE 6.2 – Allusion aux deux types de courant

Chapitre 7

Isolant électrique/Diélectrique

En électricité comme en électronique, un isolant, ou isolant électrique aussi appelé matériau diélectrique, est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices. Un isolant possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique.

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. À ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. On compte parmi ces milieux : le vide, le verre et de nombreux plastiques.

Cependant, lorsque le champ électrique devient trop intense, le diélectrique peut "claquer" et un courant électrique peut alors y circuler. Ce phénomène est à l'origine des éclairs émis par la bobine de Tesla, l'air claque sous un champ électrique trop intense et devient conducteur.



FIGURE 7.1 – Diverses céramiques : excellents isolants électriques

Chapitre 8

Champ électrique

On désigne par champ électrique un champ créé par des particules électriquement chargées. Un tel champ permet de déterminer en tout point de l'espace la force électrique exercée à distance par ces charges. Dans le cas de charges fixes dans le référentiel d'étude, le champ électrique est appelé champ électrostatique. Lorsque les charges sont en mouvement dans ce référentiel, il faut y ajouter un champ électrique induit dû aux déplacements des charges pour obtenir le champ électrique complet.



FIGURE 8.1 – Visualisation d'un champ électrique produit par une particule chargée positivement (gauche) et négativement (droite)

Le champ électrique peut ainsi mettre en mouvement des particules chargées puisque chaque particule chargée, portant une charge q et placée dans un champ électrique E est soumise à une force $F = qE$. À la différence du champ magnétique il est capable d'accélérer une particule chargée. Bien que négligeable à une grande échelle devant l'interaction gravitationnelle car la matière est globalement neutre électriquement, le champ électrique a un effet prépondérant à des échelles microscopiques, et est utilisé pour l'étude de la matière dans les accélérateurs de particules.

Chapitre 9

Champ magnétique

Le champ magnétique est une grandeur caractérisée par la donnée d'une intensité et d'une direction, définie en tout point de l'espace, et déterminée par la position et l'orientation d'aimants, d'électroaimants et le déplacement de charges électriques. La présence de ce champ se traduit par l'existence d'une force agissant sur les charges électriques en mouvement (dite force de Lorentz), et divers effets affectant certains matériaux (paramagnétisme, diamagnétisme ou ferromagnétisme selon les cas).

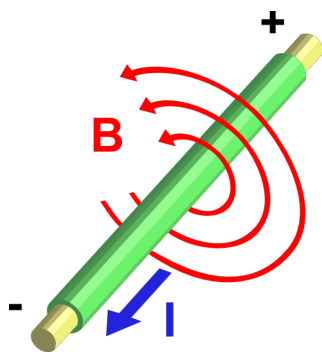


FIGURE 9.1 – Champ magnétique émis par un fil parcouru par un courant

Les champs électriques et magnétiques sont souvent liés, ce sont les champs électromagnétiques dont l'exemple le plus connu est la lumière.

Outre l'exemple classique de l'aimant, l'un des champs magnétiques les plus importants est le champ magnétique généré par la Terre et qui nous protège du vent solaire.

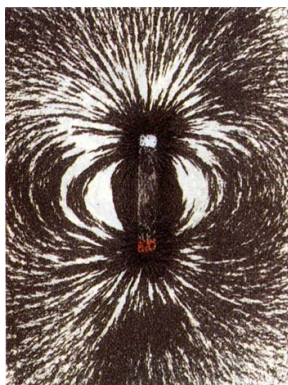


FIGURE 9.2 – Mise en évidence du champ magnétique : déplacement de la limaille de fer autour d'un aimant