

LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES PASSIFS

par

Roxana BREAHA

Sommaire

I - Introduction

II - Les résistances

- 1) Définition de la résistivité
- 2) La résistance électrique
- 3) Schéma électrique d'une résistance parfaite
- 4) Relation V-I pour une résistance parfaite (loi d'Ohm)
- 5) La puissance dissipée dans une résistance parfaite
- 6) Modèle électrique des résistances réelles
- 7) Différents types de résistances
- 8) Les caractéristiques publiées par les constructeurs
- 9) Le marquage des résistances
- 10) Les résistances variables

III - Les condensateurs

- 1) Définition de la capacité
- 2) Schéma électrique d'un condensateur parfait
- 3) Relation V-I pour un condensateur parfait
- 4) Quantité de charge et énergie stockée par un condensateur parfait
- 5) Le modèle électrique des condensateurs réels
- 6) Les différents types de condensateurs

IV - Les bobines

- 1) Définition de l'inductance
- 2) Schéma électrique d'une bobine parfaite
- 3) Relation V-I pour une bobine parfaite
- 4) Énergie stockée par une bobine parfaite
- 5) Le modèle électrique des bobines réelles
- 6) Valeur d'inductance pour un toroïde
- 7) Les matériaux pour la construction d'une bobine
 - a) Les matériaux (ferro)magnétiques
 - b) Les matériaux conducteurs

V - Références

I. Introduction

Dans les modèles de circuit, on considère chaque composant électronique passif comme un composant parfait. Il existe trois sortes de composants parfaits et leurs caractéristiques dépendent de la manière dont ils traitent l'énergie qu'ils reçoivent.

- Résistance idéale: L'énergie fournie à une résistance est consommée et dissipée sous forme de chaleur. Une résistance agit toujours comme un récepteur (puissance absorbée).
- Bobine idéale: L'énergie absorbée par une bobine est stockée sous la forme d'énergie magnétique. Elle agit alors comme un récepteur (puissance absorbée). La bobine peut ensuite rendre cette énergie stockée au circuit électrique en transformant l'énergie magnétique en énergie électrique. Elle agit alors comme un générateur (puissance fournie).
- Condensateur idéal: L'énergie absorbée par un condensateur est stockée sous la forme d'énergie électrique. Il agit alors comme un récepteur (puissance absorbée). Le condensateur peut ensuite rendre cette énergie stockée au circuit électrique. Il agit alors comme un générateur (puissance fournie).

Cependant, en pratique, la technologie ne permet pas de fabriquer des composants parfaits. Ainsi une résistance est légèrement inductive (résistance bobinée) ou capacitive suivant les cas. Il en va de même des inductances ou des capacités qui présentent aussi des caractéristiques parasites. Suivant les conditions d'utilisation, ces caractéristiques parasites peuvent être négligeables ou au contraire devenir prépondérantes.

En général, lors de l'étude d'un circuit électronique, on considère les composants passifs comme parfaits. Cependant, il est essentiel de bien connaître la technologie des composants électroniques passifs et leurs modèles pour les utiliser à bon escient. Ainsi, il sera possible de comprendre des écarts significatifs entre les prédictions théoriques et les mesures expérimentales.

II. Les résistances

1) Définition de la résistivité

Tous les corps dans la nature sont formés de molécules et d'atomes. La **molécule** est la plus petite parcelle du corps que l'on peut obtenir à l'état libre ($\sim 10^{-6}$ mm). L'atome est la plus petite parcelle d'un élément qui entre dans la composition d'une molécule. Il est composé d'un noyau très petit et très dense, entouré à de grandes distances relatives par des électrons en rotation ultra-rapide. L'**électron** est une particule stable de masse $9.1 \cdot 10^{-28}$ g et il possède une charge électrique négative de 1.6×10^{-6} C.

Les électrons se situent à des distances du noyau qui correspondent à des niveaux d'énergie bien déterminés. Certains électrons participant aux liaisons atomiques sont dans la **bande de valence**. Certains électrons, très faiblement liés et pratiquement libres, sont dans la **bande de conduction**. Entre ces deux bandes se trouve une **bande interdite** plus ou moins large selon la nature des corps.

La largeur de la bande interdite permet de faire une classification des corps comme étant:

- **isolants:** La bande interdite est large. Aucun électron de valence ne peut sauter dans la bande de conduction et la conductivité électrique est très faible. Les meilleurs isolants sont la **bakélite**, le **mica**, les **céramiques**, les **quartz**, les **plastiques spécialisés**, etc.
- **conducteurs:** La bande interdite est presque inexistante. Des électrons se trouvent toujours dans la bande de conduction. Au voisinage du zéro absolu (0°K), par suite de l'arrêt de l'agitation thermique, leur résistivité est très inférieure à celle relevée à la température normale (**supraconductivité**). Les meilleurs conducteurs sont l'**argent**, le **cuivre**, l'**aluminium**.

À la température ambiante, les électrons libres dans un corps, ne sont pas complètement libres de se déplacer sous l'effet d'une tension appliquée. Ceux-ci entrent constamment en collision avec des atomes ce qui crée une certaine opposition au passage du courant électrique d'où la notion de **résistivité**.

La résistivité (ρ) est l'unité qui mesure la propriété d'un corps à avoir des électrons libres dans la bande de conduction. Elle s'exprime en **ohm-mètre**. Elle est variable en fonction de la température. La résistivité à la température $T(^{\circ}\text{C})$ par rapport à 0°C se déduit de la relation suivante:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T)$$

$$\rho_{\text{Ag}} = 15.0 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\text{Ag}} = 0.00411 [1/^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 15.9 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\text{Cu}} = 0.00427 [1/^{\circ}\text{C}]$$

$$\rho_{\text{Al}} = 26.0 \text{ n}\Omega\cdot\text{m à } 0^{\circ}\text{C} \quad \alpha_{\text{Al}} = 0.00439 [1/^{\circ}\text{C}]$$

α est le coefficient de température qui peut être **positif** (la plus part de **conducteurs**) ou **négatif** (un grand nombre de **semiconducteurs**, **isolants** et **quelques alliages**). L'ordre de grandeur des résistivités pour les **conducteurs** correspond à **quelques nΩ.m** et pour les **isolants**, il atteint **$10^{18} \Omega\cdot\text{m}$** .

2) La résistance électrique

La résistance d'un corps dépend de sa résistivité et de ses dimensions.

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R résistance en ohm [Ω]

l longueur en mètre [m]

S section en mètre carré [m^2]

ρ résistivité en ohm-mètre [$\Omega\cdot\text{m}$]

3) Modèle d'une résistance parfaite

Le symbole utilisé pour représenter une résistance parfaite dans les schémas de circuit est le suivant. On utilise généralement une convention récepteur pour caractériser une résistance (le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur la figure). Avec cette convention, la puissance absorbée a une valeur positive.

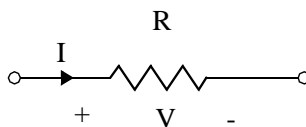


Figure 1 Symbole d'une résistance parfaite

4) La loi d'Ohm (caractérise une résistance parfaite)

Il s'agit d'une relation entre la tension et le courant (relation V-I) qui caractérise le comportement d'une résistance. En imposant une convention récepteur comme indiqué sur la figure précédente (courant qui va dans le sens des potentiels décroissants), la loi d'Ohm s'écrit:

$$V = RI$$

On a aussi: $R = \frac{V}{I}$ et $G = \frac{1}{R}$

R résistance en ohm [Ω]

I courant en ampère [A]

V tension en volt [V]

G conductance en siemens [S ou $1/\Omega$]

5) La puissance dissipée dans une résistance parfaite

Les chocs des électrons dans le conducteur, libèrent une énergie qui est transformée en chaleur. Cette transformation irréversible est analogue à un frottement mécanique. La puissance dissipée sous forme de chaleur est:

$$P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

P puissance en watt [W]

R résistance en ohm [Ω]

I courant en ampère [A]

V tension en volt [V]

6) Modèle électrique des résistances réelles

Il n'existe pas de technologies qui permettent de réaliser une résistance parfaite. Le modèle équivalent d'une résistance réelle établi avec des composants parfaits est le suivant.

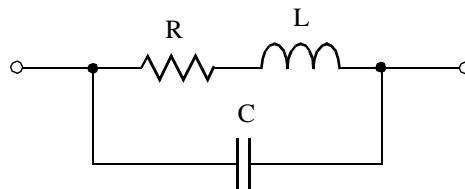


Figure 2 Modèle d'une résistance réelle.

Les résistances de **faibles valeurs** (< 30 Ω) sont toujours **inductives** et devraient être montées en série dans le circuit en évitant toute inductance parasite. Les résistances de **fortes valeurs** (> 3000 Ω) sont **capacitives** et devraient être montées en parallèle dans le circuit en évitant toute capacité parasite. Les résistances **moyennes** (**entre 30 Ω et 3000 Ω**) ont leur terme réactif qui s'annule pour une certaine fréquence. Elles sont difficiles à monter, car on doit limiter aussi bien l'effet de la capacité parasite que celui de l'inductance parasite.

7) Les différents types de résistances

Les résistances bobinées de puissance dissipent une puissance élevée. Elles ne peuvent pas être employées en haute fréquence à cause de leur inductance parasite élevée.

Les résistances bobinées de précision présentent un volume plus important à puissance égale que les résistances bobinées normales. Elles offrent une très haute stabilité, un coefficient de température et une tension de bruit négligeables et sont utilisées comme étalon dans les circuits nécessitant une grande précision. Les modèles normaux ne peuvent pas être utilisés en haute fréquence.

Les résistances à couche peuvent être soit au carbone, soit à film métallique. Elles ont une bonne stabilité, un coefficient de température et un coefficient de tension très bas. Leur fiabilité est remarquable. Cependant, elles nécessitent des précautions d'emploi, car, aux valeurs élevées, leur couche est très mince et elles peuvent être endommagées par une surcharge ou par une maladresse au cours du montage. Celles à film métallique sont les plus intéressantes pour les hautes fréquences.

Les résistances agglomérées sont petites et les plus utilisées en raison de leur prix. Leur stabilité est médiocre, leur tension de bruit et leur coefficient de température et de tension sont appréciables. Elles ont une bonne fiabilité si elles sont correctement utilisées dans des circuits admettant leurs caractéristiques.

8) Les caractéristiques publiées par les constructeurs

Chaque fabricant donne des spécifications techniques pour ses résistances:

Résistance nominale: C'est la valeur indiquée sur le corps de la résistance

Tolérance: C'est un pourcentage, en plus ou en moins autour de la valeur nominale, que le fournisseur s'engage à respecter.

Puissance nominale (P_n): C'est la puissance que peut dissiper la résistance dans l'air en convection naturelle (sans ventilation) à la pression atmosphérique avec une température ambiante comprise entre 20 °C et 70 °C, selon les modèles. Pour obtenir une bonne fiabilité de montage, il ne faut jamais dépasser 50% de P_n pour les résistances de précision et 70% de P_n pour les résistances d'usage courant.

Tension maximale aux bornes: C'est la tension aux bornes de la résistance à ne pas dépasser. Elle est limitée par la rigidité diélectrique des constituants de la résistance. Pour une puissance donnée, elle se déduit de la relation suivante:

$$V = \sqrt{P \cdot R}$$

V tension en volt [V]

P puissance en watt [W]

R résistance en ohm [Ω]

Coefficient de tension: Il caractérise la variation de la valeur de la résistance en fonction de la tension à ses bornes. Il s'exprime en [% variation / V].

Coefficient de température (α): Il exprime la variation de la valeur de la résistance par degré d'élévation de température. Comme cette variation est très faible, il est mesuré en [10^{-6} / °C]. Dans certains catalogues, il est exprimé en part par million [ppm/°C].

Stabilité: On dit qu'une résistance est stable lorsque, après un long usage, sa valeur reste proche de celle qu'elle avait à l'origine. Cette variation de valeur dépend du type et de la technologie de fabrication. La stabilité est indiquée par le fabricant pour chacun de ses modèles.

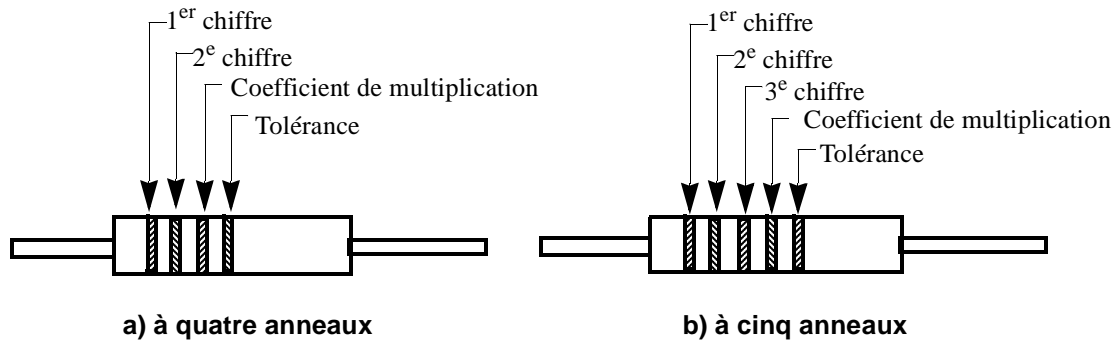
Tension de bruit: Toutes les résistances produisent aux bornes une tension parasite générée par l'agitation thermique des molécules en fonction de la température absolue. Il n'est pas possible de réduire ou modifier ce bruit, appelé "bruit blanc" à une température donnée. Cette tension de bruit s'exprime en [mV/V]. Le bruit sera d'autant plus élevé que la résistance est importante.

9) Le marquage des résistances

Il s'effectue soit en clair, soit selon le code des couleurs normalisé.

- **En clair:** pour les résistances de puissance, de précision, à haute stabilité et les modèles spéciaux.
- **Code des couleurs:** Pour les résistances agglomérées ou à couche d'usage courant. Le code de couleur est indiqué sur la figure 3.

Si la résistance est trop petite pour recevoir toutes les indications normalisées, elles sont portées sur l'emballage. Les résistances marquées selon le code des couleurs sont petites et ne peuvent recevoir sur le corps que leur valeur ohmique et la tolérance au moyen des anneaux colorés.



Couleurs	Chiffres significatifs	Coefficient de multiplication	Tolérance
argent		0.01	±10 %
or		0.1	±5 %
noir	0	1	
brun	1	10	±1 %
rouge	2	10^2	±2 %
orange	3	10^3	
jaune	4	10^4	
vert	5	10^5	
bleu	6	10^6	
violet	7		
gris	8		
blanc	9		

Figure 3 Code international des couleurs

10) Les résistances variables

Les résistances variables fonctionnent principalement en continu et sont communément appelées:

- **potentiomètres**: On utilise les trois bornes de la résistance variable séparément pour régler la tension aux bornes de la charge (montage parallèle).

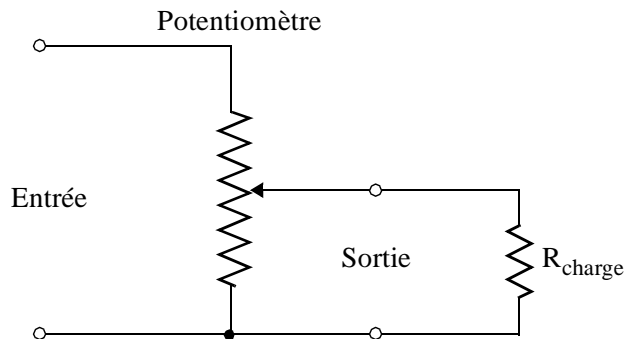


Figure 4 Résistance variable montée en potentiomètre.

- **rhéostats**: On utilise deux bornes de la résistance variable pour régler l'intensité du courant dans la charge (montage série).

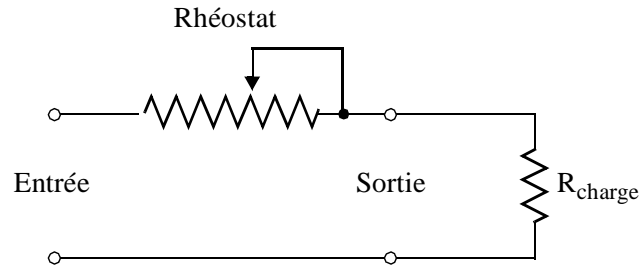


Figure 5 Résistance variable montée en rhéostat.

III. Les condensateurs

1) Définition de la capacité

Deux corps conducteurs, séparés par un isolant, constituent un **condensateur**. Donc, tout conducteur isolé possède une capacité par rapport aux autres conducteurs et par rapport à la masse. La valeur de cette capacité est:

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

C Capacité en farad [F]

S Surface des conducteurs traversés par le champ et placés en regard [m²].

e Épaisseur du diélectrique qui sépare les deux conducteurs [m]

ϵ_0 Constante diélectrique ou permittivité relative du diélectrique par rapport au vide (dans le vide $\epsilon_0 = 1$)

Le farad est une unité beaucoup trop grande pour les applications pratiques. On utilise couramment:

- microfarad (μF) = 10^{-6} F
- nanofarad (**nF**) = 10^{-9} F
- picofarad (**pF**) = 10^{-12} F

2) Modèle d'un condensateur parfait

Le symbole utilisé pour représenter un condensateur parfait dans les schémas de circuit est montré dans la Figure 6. Le condensateur est un élément de stockage d'énergie (il peut absorber ou fournir de la puissance). On utilise généralement une convention récepteur pour caractériser un condensateur (le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur la figure 6). Avec cette convention, la puissance absorbée a une valeur positive.

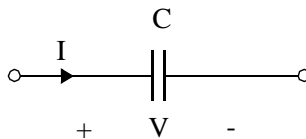


Figure 6 Symbole d'un condensateur parfait.

3) Relation V-I pour un condensateur parfait

Le condensateur idéal est un élément de circuit (dipôle) qui laisse passer un courant proportionnellement aux taux de changement de la tension appliquée entre ses bornes. En convention récepteur (Fig. 6), on a:

$$i = C \cdot \frac{dv}{dt}$$

La constante de proportionnalité (**C**) est appelée **la capacitance** (ou capacité) de l'élément.

4) Quantité de charge et énergie stockée par un condensateur parfait

La quantité de charge électrique emmagasinée par un condensateur est:

$$Q = CV$$

Q Charge électrique en coulomb [C]

C Capacité en farad [F]

V Tension en volt [V]

La quantité d'énergie emmagasinée par un condensateur dépend directement de la tension à ses bornes et de la valeur de la capacitance. La tension est limitée par la nature et par l'épaisseur du diélectrique. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, un arc prend naissance entre les armatures et détruit l'isolant.

$$W = \frac{QV}{2} = \frac{CV^2}{2}$$

W énergie en joule [J]

C capacité en farad [F]

V tension en volt [V]

5) Modèle électrique des condensateurs réels

Il n'existe pas de technologies qui permettent de réaliser un condensateur parfait. Un condensateur consomme toujours une partie de puissance qui est dissipée sous la forme de chaleur (résistance parasite). Le modèle d'un condensateur réel établi avec des composants parfaits est montré dans Fig. 7.

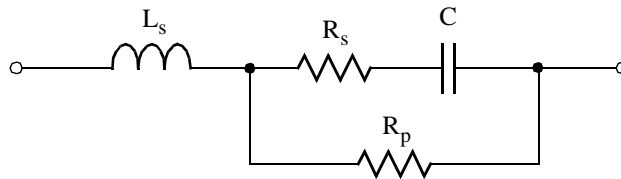


Figure 7 Modèle d'un condensateur réel.

R_S Résistance série qui est fonction de la résistance des connexions des armatures et des caractéristiques du diélectrique.

R_P Résistance parallèle qui représente les défauts d'isolement entre les armatures.

L_S Inductance qui dépend de la technologie de fabrication.

L'impédance du condensateur en régime sinusoïdal est donnée par la relation suivante:

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(L_s \omega - \frac{1}{C \omega}\right)^2}$$

L'utilisation d'un condensateur est donc limitée par sa fréquence de résonance au-delà de laquelle il a le même comportement qu'une inductance.

6) Les différents types de condensateurs

Condensateurs	Fréquence d'utilisation	Utilisations
au papier	<1kHz	filtres industriels, facteur de puissance
au papier métallisé	<100MHz	découplage miniature, liaison BF, anti-parasite; plus coûteux
au film plastique ou au film plastique métallisé	<10.000 MHz	tous usages, accord des circuits
au mica	entre 1kHz et 10.000 MHz	accord des circuits H.F., ligne à retard
au verre	entre 1kHz et 10.000 MHz	remplace le mica dans toutes les applications H.F
céramique (groupe I)	entre 100 Hz et 10.000 MHz	circuits H.F. de puissance, accord et dérive H.F.
céramique (groupe II)	entre 1kHz et 200 MHz	découplage H.F
électrolytiques à l'aluminium	< 1 kHz	découplage, filtrage, liaison transistors
électrolytiques au tantale	<100 kHz	découplage, filtrage, circuits transistorisés

IV. Les bobines

1) Définition de l'inductance

Le passage d'un courant électrique i dans une bobine crée un **flux magnétique** Φ . La loi de Lenz montre que la tension aux bornes de la bobine impose les variations du flux et vice versa.

Le flux magnétique n'étant pas une variable de circuit électrique facile à manipuler, les concepteurs de circuits ont défini une relation V-I pour caractériser les bobines, en faisant apparaître un coefficient de proportionnalité entre le flux et le courant. Ce coefficient de proportionnalité s'appelle l'**inductance** (ou l'inductance propre) de la bobine. L'inductance s'exprime en henry [H].

$$\Phi = Li$$

Φ Flux en weber [Wb]

i Courant en ampère [A]

L Inductance en henry [H]

La relation précédente suppose que le coefficient de proportionnalité (ou inductance) est constant quelque soit l'intensité du courant (bobine idéale). En fait, ce n'est pas le cas en pratique sauf si la bobine n'a pas de noyau (bobine à l'air). Dans le cas des bobines avec noyau en fer, il apparaît un phénomène de saturation magnétique lorsque l'intensité du courant est élevée. Le flux n'augmente plus aussi rapidement et par conséquent la valeur de l'inductance diminue avec la saturation. L'inductance d'une bobine dépend donc de l'intensité du courant.

2) Modèle d'une bobine parfaite

Le symbole utilisé pour représenter une bobine parfaite dans les schémas de circuit est montré dans Fig. 8. Une bobine est un élément de stockage d'énergie (elle peut absorber ou fournir de la puissance). On utilise généralement une convention récepteur pour caractériser une bobine (le courant va dans le sens des potentiels décroissants comme indiqué sur la figure 8). Avec cette convention, la puissance absorbée a une valeur positive.

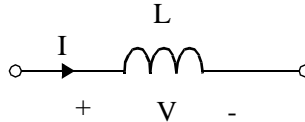


Figure 8 Symbole d'une inductance parfaite

3) Relation V-I pour une bobine parfaite

Cette relation est déduite de la loi de Lenz et de la relation de proportionnalité entre le flux et le courant. En convention récepteur (le courant va dans le sens des potentiels décroissants), on a la relation suivante:

$$V = \frac{d\Phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

V Tension en volt [V]

Φ Flux en weber [Wb]

i Courant en ampère [A]

L Inductance en Henry [H]

Dans le cas d'une bobine idéale, l'inductance L a une valeur constante.

4) Énergie stockée par une bobine parfaite

La quantité d'énergie emmagasinée est stockée sous la forme d'énergie magnétique. Elle dépend du courant qui circule dans ses enroulements. L'intensité du courant est limitée par la nature et par la grosseur des fils des enroulements. Lorsqu'elle dépasse une certaine valeur, l'isolation entre les fils est détruite suite à un échauffement excessif et il y a l'apparition de courants de court-circuit.

$$W = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2}$$

W énergie en joule [J]

Φ Flux en weber [Wb]

I Courant en ampère [A]

L Inductance en Henry [H]

5) Modèle électrique des inductances réelles

Il n'existe pas de technologies qui permettent de réaliser une bobine parfaite. Les conducteurs ont nécessairement une résistance parasite. Le modèle équivalent d'une bobine réelle établi avec des composants parfaits est le suivant.

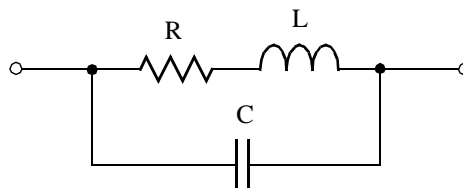


Figure 9 Modèle d'une bobine réelle.

R Résistance qui est une fonction de la résistance des connexions et des spires de la bobine.

C Capacité parallèle qui représente le couplage capacitif entre les spires.

L Inductance propre qui dépend de la technologie de fabrication.

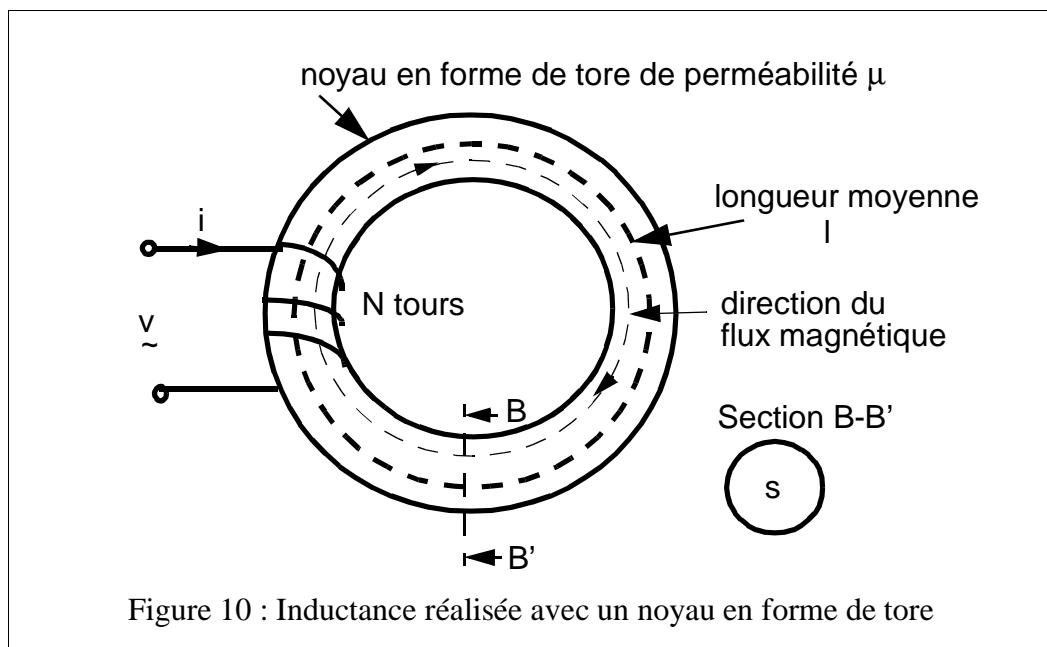
6) Valeur d'inductance pour un toroïde

Les bobines sont les seuls éléments qu'un utilisateur peut fabriquer à sa convenance en utilisant des noyaux (ferro)magnétiques standards. Le poids et les dimensions d'une bobine sont généralement beaucoup plus importants que l'ensemble des autres composants d'un circuit.

Si on considère un noyau magnétique en forme de toroïde (figure 10), la valeur de l'inductance dépend directement des caractéristiques du noyau et du nombre de spires utilisé pour la fabriquer:

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l}$$

- μ Perméabilité du matériau magnétique [H/m]
- S Section d'une coupe perpendiculaire au tore [m^2]
- l Longueur moyenne du noyau en forme de tore [m]
- N Nombre de tours de fil.



7) Les matériaux pour la construction d'une bobine

a) Les matériaux (ferro)magnétiques

L'utilisation d'un matériau ferromagnétique permet de canaliser les lignes d'induction du champ magnétique et ainsi de mieux maîtriser les trajets de flux. Le calcul d'une inductance est donc plus précis et il devient plus facile de réaliser un composant avec les caractéristiques recherchées.

Ces matériaux sont disponibles sous différentes formes. On distingue les matériaux laminés (tôles isolées électriquement) qui sont utilisés principalement pour des applications basse fréquence (inférieures à 10 kHz) et les matériaux frittés (ferrite) qui sont utilisés dans le domaine de la haute fréquence (supérieur à 10 kHz). Les caractéristiques des matériaux magnétiques les plus courants sont présentés sur le tableau suivant.

Type matériaux	Caractéristiques	Perméabilité relative μ_r	Densité de flux max. B_m [Wb/m ²]	Applications
alliage acier et silicium	acier contenant un faible dosage de silicium	1.000	1.6	Inductances et transformateurs à 60 Hz et dans les machines AC.
alliage fer-nickel	50% et plus de nickel	10.000	1.5	Amplificateurs magnétiques, inductances saturables et convertisseurs DC-DC
poudre d'alliage fer-nickel	un constituant non-magnétique sert de colle - les formes requises sont produites à haute pression	entre 10 et 100	0.6	Filtres et lorsqu'une valeur d'inductance précise est requise.
ferrites	céramique composée d'oxyde de fer et d'autres métaux magnétiques	3000	0.3	filtres et lorsqu'une valeur d'inductance précise est requise fréquences: entre 1 kHz et 10 MHz

b) Les matériaux conducteurs

Le type de conducteurs utilisé dépend directement de la fréquence de fonctionnement. À haute fréquence, il est essentiel de limiter les pertes par courants de Foucault et les pertes par effet de proximité. Les matériaux conducteurs les plus utilisés **à basse fréquence** sont **les fils de cuivre émaillés** (fils de cuivre avec un vernis isolant). Le cuivre a l'avantage d'être un excellent conducteur et d'être très malléable ce qui simplifie la réalisation du bobinage. Dans les applications **haute fréquence**, on utilise de préférence du **fil de Litz** (conducteur composé d'un nombre important de fils vernis de très faible section et qui sont tressés de manière à réduire les pertes par effet de proximité).

- **à basse fréquence**: cuivre, aluminium, fil guipé, fil émaillé.
- **à haute fréquence**: fil émaillé de faible section, fil nu argenté, fil à brins multiples, fil de Litz.

V. Références

- [1] R Besson, Technologie des composants électroniques, S.E.C.F. Edition Radio, 1980.
- [2] Théodore Wildi, Electrotechnique, Les Presses de l'Université Laval, 1991.

Résistances:

<http://www.geocities.com/Athens/Academy/7535/analog.htm>
<http://www.vishay.com>
<http://www.ohmete.com>
<http://www.dale.com>

Condensateurs:

<http://www.evov-rifa.com>
<http://www.nichicon-us.com>

Inductances:

<http://www.dale.com>
<http://www.hammondmfg.com>

Transformateurs:

<http://www.atc-frost.com>
<http://www.hammondmfg.com>

Noyaux:

<http://www.elna-ferrite.com>

Laminations:

<http://www.preba.org>

Fils:

(Litz): <http://www.neewcweb.com>
(tout type sauf Litz): <http://www.alphawire.com>

Photo experience Tesla Coil origine

<http://www.neuronet.pitt.edu/~bogdan/tesla/album.htm>