

Chapitre 2 : Les composants

par Pierre Cornélis, ON7PC rue J. Ballings, 88 1140 Bruxelles

Avant de pouvoir passer à l'étude des circuits, il faut d'abord étudier les composants qui vont y être mis en œuvre.

*Les **composants**... ce sont les pièces que vous allez utiliser pour faire vos montages d'électronique ou de radio. Ce sont des résistances, des condensateurs, des bobines, des transformateurs, des diodes, des transistors etc. ...*

Mais on distingue les composants passifs et les composants actifs. Un composant passif est un composant qui ne nécessite pas d'énergie extérieure pour fonctionner : les résistances, les bobines, les transformateurs sont des composants passifs... à l'opposé des transistors, des tubes et des circuits intégrés qui sont des composants actifs. Une comparaison : un rasoir électrique est un composant "actif" alors qu'un rasoir de sûreté, (ou "Gillette") est "passif".

L'important dans ce chapitre est de connaître les différentes sortes de résistances, de condensateurs, de bobines, de transistors, de circuits intégrés, ... de savoir comment on les fabrique, de savoir quel type utiliser dans une applications particulière, de comprendre leurs paramètres essentiels. Nous verrons alors dans les chapitres suivant comment mettre ces composants en œuvre.

Un des problèmes est de savoir où s'arrêter... En effet si on prend le cas des transistors bipolaires par exemple, on doit expliquer comment ils sont constitués (les 3 jonctions), comment ils fonctionnent, quelles sont les courbes caractéristiques, quels sont les paramètres typiques (entre autre le β), comment les polariser, quels sont les montages typiques (émetteur commun, base commune et collecteur commun), ... Tout cela appartient à l'étude des composants, donc à ce chapitre. Mais alors viennent aussi d'autres questions tel que comment les utiliser en tant qu'amplificateurs, puis passer de l'amplificateur simple à l'amplificateur différentiel, puis le montage limiteur de courant, le miroir de courant, comment utiliser les transistors comme éléments de commutation, ... toutes ces questions peuvent soit être considérées comme faisant partie de ce chapitre soit du chapitre "circuit". Mais au fond peu importe, tout doit être vu !

Les dimensions des composants pourront parfois vous étonner, ceci est du au fait que l'électronique présente de nombreux domaines d'applications, et que chaque groupe d'application a développé une technologie spécifique. Prenons l'exemple d'une résistance :

- *en électronique industrielle (commande de machine, régulation, etc.) par exemple une résistance bobinée peut mesurer 40 cm de long, et présenter un diamètre de 5 cm, elle sera reliée au circuit au moyen de cosses et de vis et de fils de 2,5 mm²,*
 - *plus couramment, nous rencontrerons des résistances à film métallique, une telle résistance ne mesure que 5 mm de long, avec un diamètre de 2 mm, elle sera connectée au circuit par deux petits fils étamés de 0,7 mm de diamètre,*
 - *si nous examinons le circuit imprimé d'un émetteur-récepteur portable moderne, nous y découvrirons des résistances qui sont directement soudées entre les pistes, ce sont des résistances réalisées selon la technologie SMC (Surface Mounted Component), une telle résistance ne mesure pas plus de 2 mm de long et 0,5 mm de large et 0,2 mm de haut !*
 - *et si nous observons une résistance sur un circuit intégré, il faudra prendre un microscope pour la voir...*
- ... mais peu importe toutes ces résistances auront la même fonction !*

Convention d'écriture

*Le texte en italique ne fait pas partie de la matière de l'examen HAREC, mais constitue une information que nous avons jugé **indispensable**.*

Le texte en caractère normal fait partie de l'examen HAREC.

Si certaines **FORMULES** sont en très gros caractères, entourées d'un gros cadre (comme ceci), c'est parce qu'il est **absolument indispensable de les connaître** pour l'examen et pour notre hobby !

Note pour les formateurs : Même si nous avons essayé d'être très complet et si nous avons fait de nombreux dessins rien de tel que de documenter ce chapitre par des composants réels, rien de tel que de "casser" des composants pour voir leur intérieur ...

2.1. Les résistances

2.1.1. Généralités

On pourrait dire qu'une résistance est un composant qui fonctionne précisément comme son nom l'indique c'est-à-dire qu'elle offre une "résistance" (suivant le dictionnaire : "qualité d'un corps qui réagit contre l'action d'un autre corps") au passage du courant électrique.

On pourrait aussi considérer qu'une résistance est un composant qui a un comportement entre celui du conducteur parfait et celui de l'isolant parfait.

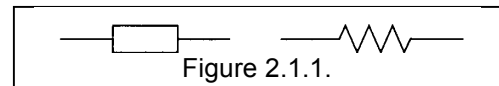
L'unité de mesure de résistance est l' **ohm**, symbolisé par la lettre grecque oméga Ω .

Un ohm représente une résistance qui, lorsqu'on lui applique 1 volt, est traversée par un courant de 1 ampère.

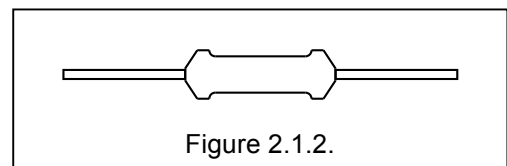
Mais on utilise aussi fréquemment les unités dérivées suivantes :

- le milliohm, symbolisé par **m Ω** , 1 m Ω = 10⁻³ ohm,
- le kilohm, symbolisé par **k Ω** , 1 k Ω = 10³ ohms, et
- le mégohm, symbolisé par **M Ω** , 1 M Ω = 10⁶ ohms.

Il existe deux symboles pour représenter une résistance. Le rectangle avec les deux fils de connexions est officiellement reconnu chez nous.



En pratique une résistance se présente comme ci-contre, mais nous verrons qu'il existe beaucoup d'autres formes de résistances.



La valeur d'une résistance peut se mesurer l'aide d'un multimètre (encore appelé Volt-Ohmmètre ou VOM) en position **ohmmètre**.

1. Avec un multimètre à aiguille, on utilise généralement un montage appelé "ohmmètre série", avec une pile (1,5 à 9 V en général) , une résistance R et une résistance R' (destiné à l'étalonnage) . Il faut noter que l'échelle n'est pas linéaire. La résistance infinie est à gauche et la résistance nulle est à droite. Avant de faire la mesure il faut faire le calibrage de l'ohmmètre, en court-circuitant les deux fils et en réglant le potentiomètre de réglage pour indiquer "zéro Ω". En suite, pour faire une mesure relativement précise, il faut choisir une échelle qui donne une lecture comprise entre 1/4 et 3/4 de l'échelle

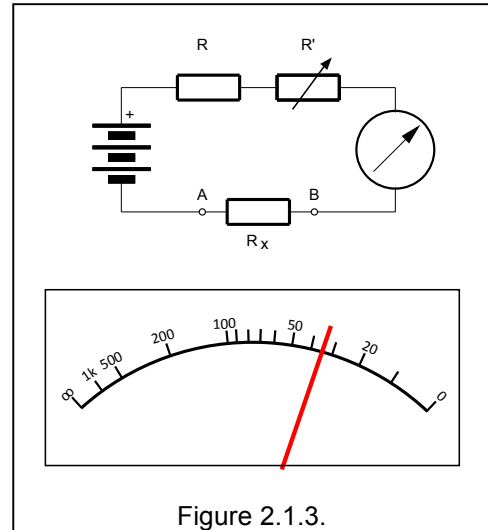


Figure 2.1.3.

2. Avec un multimètre numérique, on utilise un générateur de courant et la mesure de résistance consiste alors à mesurer une tension aux bornes d'une résistance. En principe, il y a moins de problèmes, puisqu'il suffit de choisir la bonne gamme de mesure et de lire le résultat.

Attention:

- A l'effet de "main" : La résistance des mains de l'opérateur est de l'ordre de 0,1 à 1 MΩ (selon la peau, le degré de transpiration, etc.). Il faut donc éviter de tenir les doigts sur les résistances de plus de 1 kΩ sous peine de faire des erreurs de mesures. On peut à la limite tenir un contact fermement avec les doigts, mais pas les deux à la fois.
- Pour les mesures de très faibles résistances, il ne faut oublier que les cordons et les résistances de contacts s'élèvent à 0,3 Ω environ. Il faut donc tenir compte de cette erreur de mesure lorsqu'on mesure des résistances de moins de 10 Ω.

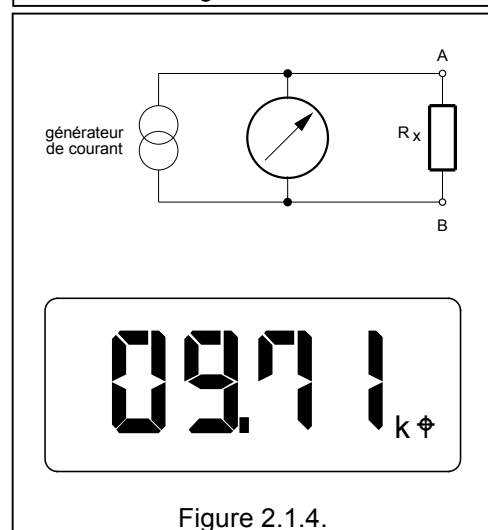


Figure 2.1.4.

On peut aussi mesurer les résistances avec un pont de mesure. Le plus célèbre est le pont de Wheatstone représenté ci-contre. Lorsque le pont est à l'équilibre, c.-à-d. lorsque le galvanomètre indique "zéro", on a

$$R_x = R_1 R_3 / R_2$$

Il est plus facile de retenir que le produit des résistances en croix est identique donc $R_x R_2 = R_1 R_3$ mais ceci devrait en fait être classé dans le chapitre 8 où on traitera les mesures.

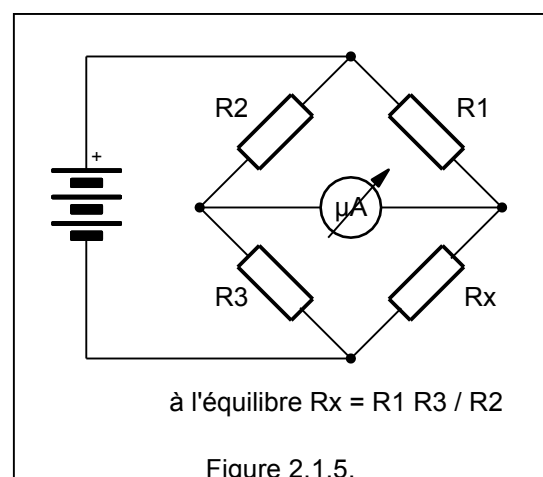


Figure 2.1.5.

2.1.2. Les facteurs qui déterminent la résistance

La relation de base (loi de Pouillet) qui régit les résistances est

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

où ρ est la résistance spécifique du matériau en $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$,
 l est sa longueur en m
 s est sa section en mm^2

La **résistance spécifique**¹ ρ d'un matériau est souvent exprimée en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, parce qu'on mesure le diamètre du fil avec un pied à coulisse en mm, qu'on en déduit la section en mm^2 et que la longueur se mesure généralement en m.

Toutefois, certains ouvrages utilisent des $\mu\Omega \text{ cm}^2/\text{cm}$ ou des $\mu\Omega \text{ cm}$, dans ce cas on doit exprimer la section en cm^2 et la longueur en cm. Ceci est un système plus "homogène", les physiciens aiment bien des "dimensions homogènes", mais c'est moins pratique car on va travailler avec des nombres où il y a beaucoup de zéro derrière la virgule Si on donne la résistivité en $\mu\Omega \text{ cm}$ il faut diviser cette valeur par 100 pour obtenir la résistivité en $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, ainsi, la résistivité du Cu est de $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \text{ cm}$.

résistance spécifique du cuivre = $0,0179 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \text{ cm}$

Ce qu'il faut surtout retenir c'est que

**la résistance est proportionnelle à la longueur,
inversement proportionnelle à la section
et, elle varie en fonction de la résistance spécifique**

Pour une résistance donnée, plus la tension appliquée à ses bornes est grande, plus le courant qui y circule est important et plus la puissance qui y sera dissipée sera élevée, et plus elle va chauffer (loi de Joule).

La quantité de chaleur (évaluée en calories) dégagée par une résistance est

$$Q_{th} = 0,24 R I^2$$

et la différence entre la chaleur produite et la chaleur évacuée détermine un accroissement de la température de l'élément.

Rappelons qu'une **calorie** permet d'augmenter la température de 1 gramme d'eau de 1°C .
une **kilocalorie** permet d'augmenter la température de 1 litre d'eau de 1°C .

¹ Pour information, le ρ de quelques matériaux :

cuivre	$0,0179 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
or	0,0244
argent	0,0146
aluminium	0,029
fer	0,139
carbone	35

Pour rappel aussi, une résistance cède sa chaleur au monde extérieur

- par **conduction** : c'est un processus physique qui met en jeu des échanges d'énergies au niveau des atomes. Par exemple : si on met une barre de fer dans le feu, au bout d'un certain temps, la partie que vous tenez en main va chauffer, ceci est typiquement un échange par conduction.
- par **convection** : ce processus requiert le passage d'un fluide (un gaz ou un liquide) qui passe au-dessus de la source de chaleur. Par exemple : lorsque l'air passe sur un radiateur (ce mot est très mal choisi) de chauffage central, il chauffe cet air par convection, et,
- par **rayonnement** : dans ce processus, il ne requiert pas de substance pour transporter la chaleur. Par exemple lorsque vous êtes devant un feu ouvert, l'échange de chaleur se fait principalement par rayonnement.

Application :

Le calorimètre HF : Pour mesurer des fortes puissances (c-à-d. des puissances > 1 kW), on branche l'émetteur sur une résistance de charge (50 Ω) autour de laquelle on fait circuler de l'eau. Le système est isolé thermiquement. Connaissant le débit, les températures d'entrée et de sortie, on peut en déduire la puissance HF :

Par définition : 1 W/s = 1 Joule = 0,24 cal d'où 1 W/min = 0,24 x 60 = 14,4 cal

Comme 1 kilocalorie élève la température de 1 litre d'eau de 1°C

d'où 1 W/min élève la température de 0,0144 litre d'eau de 1°C

d'où $P_{(Watt)} = (t' - t) \times D_{(l/min)} \times 1 / 0,0144$

Donc si, par exemple, au bout de 15 minutes, on a débité 276,9 litres d'eau et que la différence de t° est de 10°C, alors $P = 10 \times (276,9/15) \times 1/0,0144 = 12810$ Watts.

Ce type de mesure est assez peu précis et il ne donne qu'une "idée" de la puissance, mais cela est parfois suffisant !

Si la puissance dissipée dans une résistance est trop forte par rapport à la dissipation maximale admise, la température de la résistance va augmenter de façon excessive, et elle pourrait même devenir rouge, fondre, et se détruire !

Il faut donc non seulement spécifier la valeur de la résistance (en calculant le circuit) mais aussi déterminer la **puissance dissipée**, et il faudra utiliser une résistance dont la dissipation maximum est bien supérieure à la valeur calculée. Quant on dit que la dissipation admissible doit être supérieure à la puissance dissipée, cela sous-entend un facteur de sécurité compris entre 2 x et 5 x. Si par exemple dans votre calcul vous arrivez à une dissipation de 0,0834 W, une résistance de 0,1 W chauffera très fort, tandis qu'une résistance de 0,25 W assurera une très longue vie à votre montage !

Les dissipations sont normalisées, et pour l'usage courant, on trouve des valeurs de

1/10 , 1/8 , 1/4 , 1/2 , 1 et 2 watts

mais pour des applications particulières il n'est pas rare de rencontrer des résistances dont la dissipation maximum est de l'ordre de 5, 10, 25, 50, 100, voire 250 Watts

Rappelons qu'une résistance peut apparaître sous différentes formes, et n'oublions pas qu'elle peut aussi apparaître sous des formes plus subtiles telles que la résistance d'un fil, la résistance de contact, la résistance de connexion, une résistance intégrée sur un support en céramique (film épais), une résistance intégrée sur une puce électronique ("chip"),...

Si la température de la résistance varie, on observera alors une variation de la valeur de la résistance, on dit qu'à une résistance possède un **coefficient de température**.

Le coefficient de température traduit la variation relative de la valeur de la résistance en fonction de la température.

Le coefficient de température des métaux est positif, c'est-à-dire que la résistance augmente lorsque la température augmente.

$$R = R_0 (1 + \alpha t)$$

α est le coefficient de température². Cette loi est encore connue sous le nom de loi de Matthiessen. On peut encore la transformer en

$$t - t_0 = ((R_0 / R) - 1) (1/\alpha) + T$$

Voici quelques valeurs types de α :

cuivre	+ 0,004 /°C
or	+ 0,0037
argent	+ 0,004
aluminium	+ 0,004
fer	+ 0,004
constantan	0
carbone	- 0,0007

Pour la plupart des métaux, le coefficient de température est **positif**. Pour quelques matériaux, le coefficient de température est **négalif**, c'est-à-dire que la résistance diminue lorsque la température augmente, par exemple, le carbone a un coefficient de température négatif qui se situe entre $-25 \cdot 10^{-6}$ et $-200 \cdot 10^{-6}$ par °C .

Ainsi, si une résistance mesure 3000 ohms à 25°C, et que son coefficient de température est de $-80 \cdot 10^{-6}$ /°C, alors pour une température de 75 °C, sa valeur sera de $3000 (1 - 50 \times 80 \cdot 10^{-6}) = 3000 (1 - 4 \cdot 10^{-3}) = 2988$ ohms.

Exercices :

Cachez la colonne avec les solutions et faites les exercices, puis comparez.

Problème :

- 1) L'induit d'un moteur est bobiné avec du fil de Cu et possède à 20°C une résistance de 0,2 Ω . Pendant le fonctionnement cette résistance est portée à 0,25 Ω . calculez la température ?
- 2) Fabrication d'une résistance de 12 Ω à 20°C, avec du fil de maillechort d'un diamètre de 2 mm et dont $\rho = 0,3 \mu\Omega/m$ à 0°C et $\alpha = 0,0004$. Quelle est la longueur du fil ?
- 3) Un réseau est construit avec du fil de cuivre de 25 mm². Quelle est la section du fil d'aluminium qui aurait la même résistance ?
- 4) Deux bobines ont la même résistance, mais l'une a 1 mm de diamètre, l'autre en a 2. Si la première bobine mesure 10 m, quelle est la longueur de la deuxième ?
- 5) Deux bobines ont la même résistance, mais l'une a un fil de 1 mm², l'autre de 2mm². Si la première bobine mesure 10 m, quelle est la longueur de la deuxième ?
- 6) Une génératrice a une ddp de 110 V et débite 275 A qui doivent être transporté sur une distance de 200 m par des câbles en Cu ($\rho=0,0154$ et $\alpha 0,0004$) . On veut que la

solution :

$$t - 20 = ((0,25/0,2)-1) ((1/0,004) + 20)$$

$$t - 20 = 0,25 \times 270 = 67,5$$

$$\text{donc } t = 67,5 + 20 = 87,5 \text{ °C}$$

$$s = 3,14 \text{ mm}^2$$

$$\rho = 0,3 (1 + 0,0004 \times 20) = 0,3024 \mu\Omega/m$$

$$l = 12 \times 3,14 \times 10^{-6} / 0,3024 \cdot 10^{-6} = 124 \text{ m}$$

$$0,0179 \times l / 25 = 0,029 \times l / S$$

$$\text{donc } S = 0,029 \times 25 / 0,0179 = 40,5 \text{ mm}^2$$

$$l / s = l' / 4 s$$

$$\text{donc } l' = 4 l = 4 \times 10 = 40 \text{ m}$$

$$l / s = l' / 2 s$$

$$\text{donc } l' = 2 l = 2 \times 10 = 20 \text{ m}$$

$$r = (110 - 100) / 275 = 0,036 \Omega$$

$$s = 0,0154 \times 200 / 0,036 = 85,5 \text{ mm}^2$$

charge soit alimentée par 100 V. Quelle est la section des câbles à utiliser ?

En fonction du temps, sous l'effet de l'humidité ou d'agents chimiques et atmosphériques, la valeur nominale d'une résistance peut varier, on définit ainsi la stabilité, d'une résistance dans le temps.

Certaines résistances portent un nom qui désigne spécifiquement leur application, par exemple on parlera

- d'une **résistance chutrice** si la fonction principale est de créer une chute de tension (par exemple pour pouvoir utiliser un relais 6 V dans un montage alimenté en 12 V)
- d'une **résistance de saignée** ("bleeder") si elle a pour but de décharger un condensateur après la coupure de la tension d'alimentation.
- d'un **shunt**, si la résistance est en parallèle sur un ampèremètre pour en diminuer la sensibilité,
- d'une **résistance additionnelle** si elle sert à augmenter le calibre d'un voltmètre... etc.

Sur ce monde rien n'est parfait et une résistance n'échappe pas à cette loi, elle possède malheureusement de l'inductance parasite (fil de connexion et le bobinage même d'une résistance bobinée), et de la capacité parasite (capacité entre chacune des spires de la résistance, entre les fils de connexions,...). **L'inductance parasite et la capacité parasite** limite généralement la plage de fréquence d'utilisation d'une résistance.

2.1.3. Codes de marquage

Il n'est pas aisé de mesurer chaque résistance que l'on devra utiliser pour réaliser un montage, il n'est pas aisé de sortir chaque fois le multimètre pour connaître la valeur de la résistance. C'est pourquoi les fabricants de résistances ont décidé de "marquer" leurs résistances avec un code.

Toutefois lors d'un dépannage, ou lorsqu'il y a un doute (lisibilité des couleurs) on n'hésitera pas à reprendre l'ohmmètre pour contrôler ...

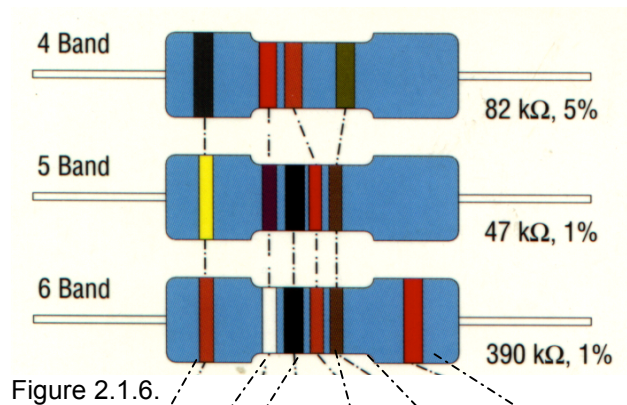
2.1.3.1. Code des couleurs

On distingue des résistances avec 4 , 5 ou 6 bandes de couleurs.

On commence par tenir la résistance horizontalement devant soi, et s'il y a un plus grand espace non marqué, on le met à droite ; c'est le cas des résistances à 4 ou 5 bandes.

Pour les résistances à 6 bandes, il est un peu plus difficile de trouver quel est le bon côté, mais on remarquera que l'espace entre les bandes n'est pas identique.

- si la résistance comporte 6 anneaux de couleurs, alors l'anneau le plus à droite indique le coefficient de température,
- l'anneau suivant indique la tolérance,
- l'anneau qui précède indique un multiplicateur (sous forme de 10 exposants quelque chose)
- les 2 ou 3 anneaux à gauche indique la valeur



	valeur	multiplicateur	tolérance	coeff. de t°
(rien)			± 20%	
argent		x 0,01	± 10%	
or		x 0,1	± 5 %	
noir	0	x 1		200 10 ⁻⁶
brun	1	x 10	± 1 %	100 10 ⁻⁶
rouge	2	x 100	± 2 %	50 10 ⁻⁶
orange	3	x 1 k		15 10 ⁻⁶
jaune	4	x 10 k		25 10 ⁻⁶
vert	5	x 100 k	± 0,5%	
bleu	6	x 1 M	± 0,25%	
violet	7	x 10 M	± 0,1%	
gris	8			
blanc	9			

La partie grisée de ce tableau doit être connue par cœur, non seulement pour les besoins habituels, mais aussi pour l'examen de radioamateur.

Voici un moyen mnémotechnique pour retenir les couleurs :

Ne	Mangez	Rien	Ou	Jeûnez	Voilà	Bien	Votre	Grande	Bêtise
Noir	Marron	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Exercices:

Cachez la colonne avec les solutions et faites les exercices, puis comparez.

Quelle est la valeur de la résistance marquée...

					<u>Solution :</u>	
orange	orange	jaune	or		330 k	5%
brun	noir	rouge	or		1 k	5%
brun	noir	jaune	or		100 k	5%
orange	blanc	brun	or		390	5%
brun	noir	bleu	or		10 M	5%
jaune	violet	rouge	or		4,7 k	5%
rouge	rouge	or	or		2,2	5%
orange	orange	rouge	argent	brun	3,32	1%
bleu	gris	rouge	or		6,8 k	5%
rouge	violet	rouge	or		3,7 k	5%
brun	noir	noir	or		10	5%
brun	gris	rouge	or		1,8 k	5%
brun	vert	brun	or		150	5%
brun	noir	noir	brun	brun	1 k	1%
brun	noir	rouge	or		1 k	5%

Quelles sont les couleurs d'une résistance de ...

		<u>Solution :</u>			
330 k	5%	orange	orange	jaune	or
2,2 k	5%	rouge	rouge	rouge	or
3,9 k	5%	rouge	blanc	rouge	or
10 k	5%	brun	noir	orange	or
180	5%	brun	gris	brun	or
1 M	5%	brun	noir	vert	or
22	5%	rouge	rouge	noir	or
5,6 k	5%	vert	bleu	rouge	or
3,32	1%	orange	orange	rouge	argent brun
100	5%	brun	noir	brun	or
18 k	5%	brun	gris	orange	or
47 k	5%	jaune	violet	orange	or
1100	1%	brun	brun	noir	brun brun

2.1.3.2. Code à chiffres

Pour les résistances de puissance, de précision et pour les résistances CMS, le marquage se fait en clair.

Mais notons aussi qu'un code d'origine japonaise tend à s'imposer maintenant, principalement sur les schémas, mais aussi sur les composants, il consiste en 3 chiffres, les deux premiers donnent la valeur, le dernier donne le multiplicateur exprimé en 10^x ;

Exemples : **223** représente 22×10^3 soit 22×1000 ohms soit 22 kilohms
 470 représente 47×10^0 soit 47 ohms (il y a 0 zéro !)
 685 représente 6 800 000 ohms soit 6,8 Mohms

Sur les schémas européens on utilise un code assez semblable : une lettre représente un multiplicateur :

E = unité	K = kilo	M = méga
------------------	-----------------	-----------------

la lettre est placée comme point décimal

<u>exemples :</u>	22K	représente 22 000 ohms soit 22 kilohms
	47E	représente 47 ohms
	0E1	représente 0,1 ohms
	5K6	représente 5 600 ohms ou 5,6 kilohms
	6M8	représente 6 800 000 ohms ou 6,8 Mohms...

2.1.4. Tolérance et valeurs normalisées

Supposons que dans un montage donné, le calcul du circuit nous conduit une valeur de 4634,91 ohms, il est inconcevable de commander une résistance de 4634,91 ohms au marchand de composants, non seulement parce que les stocks de composants seraient gigantesques, mais aussi parce que dans la plupart des cas une telle précision n'est pas requise.

C'est ainsi que l'on a décidé de normaliser des séries de résistances, et de définir des classes de tolérances telles que

20%, 10% , 5% , 2% , 1% , etc..

Cela veut dire qu'une résistance marquée 4700 ohms \pm 10% aura une valeur réelle comprise entre 4230 ohms c.-à-d. $4700 - 10\% = 4700 - 470$, et, 5170 ohms c.-à-d. $4700 + 10\% = 4700 + 470$, et probablement que dans un lot (d'un million d'exemplaires peut être ?) il y en aura une qui vaudra précisément 4634,91 ohms !

D'autre part, pour le fabricant il faut que toutes les résistances sortant de la chaîne de fabrication puissent entrer dans "la fourchette" d'une valeur normalisée, sinon il aurait un "surplus" invendable !

En termes mathématiques, si **t** est la tolérance, il faut donc que chaque valeur normalisée dans la série, soit égale à la précédente multipliée par $(1 + 2 t)$.

Par exemple, si on veut faire une série à 10%, en partant de la valeur 10 ohms, nous aurons donc :

- 10 Ω
- puis $10 (1 + 2 \times 0,01) = 10 \times 1,2 = 12 \Omega$
- puis $12 (1 + 2 \times 0,01) = 12 \times 1,2 = 14,4 \Omega$, arrondissons à 15 Ω
- puis $15 \times 1,2 = 18 \Omega$ et ici il n'est pas nécessaire d'arrondir,
- puis $18 \times 1,2 = 21,6 \Omega$, arrondissons à 22 Ω
- puis $22 \times 1,2 \dots$ etc.

On obtient ainsi les valeurs normalisées dans la série à 10% :

10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82

et multiples et sous-multiples, cette série est encore appelée E12 parce qu'il y a 12 valeurs par décade.

Pour la série à 5% nous avons :

**10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 20, 22, 24, 27, 30,
33, 36, 39, 43, 47, 51, 56, 62, 68, 75, 82, 91**

et multiples et sous-multiples, cette série est encore appelée E24 parce qu'il y a 24 valeurs par décade.

Et enfin pour la série à 1%

100, 102, 105, 107, 110, 113, 115, 118, 121, 124, 127, 130, 133, 137, 140, 143, 147, 150, 154, 158, 162, 165, 169, 174, 178, 182, 187, 191, 196, 200, 205, 210, 215, 221, 226, 232, 237, 243, 249, 255, 261, 267, 274, 280, 287, 294, 301, 309, 316, 324, 332, 340, 348, 357, 365, 374, 383, 392, 402, 412, 422, 432, 442, 453, 464, 475, 487, 499, 511, 523, 536, 549, 562, 576, 590, 604, 619, 634, 649, 655, 681, 698, 715, 732, 750, 768, 787, 806, 825, 845, 866, 887, 909, 931, 953, 976

et multiples et sous-multiples et encore appelée série E96.

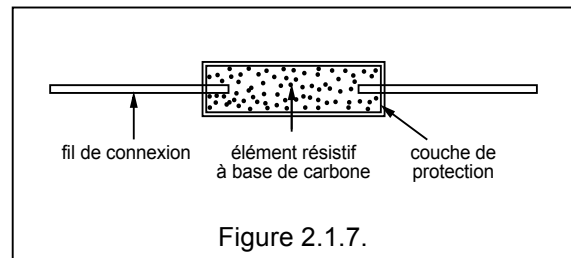
Ne mémorisez pas la série E96, mais nous vous conseillons d'essayer de connaître la série E24, c.-à-d. celle à 5 % , car vous l'utiliserez très fréquemment ! C'est pour cette raison que nous avons mis la série E24 en gras !

2.1.5. Types de résistances

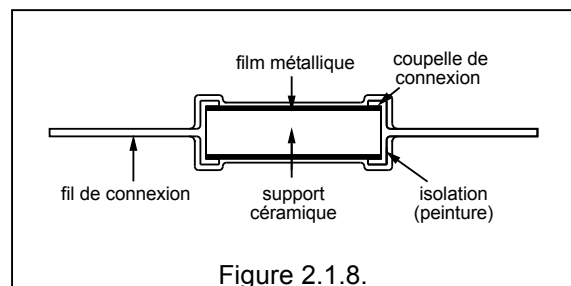
2.1.5.1. Les résistances fixes

- **Résistances agglomérées** : Elles sont constituées de bâtonnets de matière résistante moulée, à base de carbone. Ces résistances ont un souffle relativement élevé, une stabilité médiocre, et un coefficient de température fort variable.

Si ce type de résistance fut fortement utilisé par le passé, actuellement il n'est pratiquement plus utilisé. Nous le mentionnons simplement "pour mémoire".



- **Résistances à couche métallique** : Sur un cylindre en matière céramique on dépose une mince couche de métal (alliages de chrome et de nickel) par vaporisation. Cette couche résistante est recouverte d'une peinture protectrice. Le contact est réalisé soit au moyen de coupelles métalliques, soit directement par les fils de connexions qui pénètrent dans le cylindre de céramique. Pour des valeurs élevées de résistance, la couche est déposée sous forme de spirale. Les fils de connexions peuvent parfois être repliés pour un montage vertical.



Les valeurs courantes vont de 1 ohm à 22 Mohms. La dissipation varie de 1/8 Watt à 3 Watts. Le coefficient de température est positif ($0,1 \cdot 10^{-3} / ^\circ\text{C}$).

Mais, même si la puissance n'est pas dépassée, ces résistances ont une tension limite. Soit une résistance de 1 Mohms et d'une dissipation de 1/2 Watts, on pourrait en déduire qu'on peut appliquer une tension maximale de 707 V. Ceci n'est en fait pas le cas car il y aura claquage du diélectrique (le support en céramique, la couche de peinture de protection, etc ...) pour une tension plus faible. En général la tension maximum est de 200 à 350 V.

Les résistances à couche métallique sont certainement les résistances les plus utilisées.

- **Résistances de précision** : Dans les appareils de mesures, on utilise habituellement des résistances de hautes précisions (0,01% à 1%).
- **Résistances bobinées**³ : Elles sont constituées par un fil résistant enroulé sur un tube en céramique, l'enroulement est ensuite recouvert d'un ciment réfractaire ou d'un vernis vitrifié qui la protège. Parmi les alliages résistants qui peuvent être utilisés citons
 - le nickel-chrome (NiCr)
 - le nickel-fer,
 - le manganin (86%Cu-12%Mn-2%Ni) dont la résistivité est de $43 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
 - le constantan (54%Cu-45%Ni-1%Mn) dont la résistivité est de $50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
 - le zéranin (88% Cu - 6% Mn - 6% Ge) dont la résistivité est de $43 \mu\Omega \cdot \text{cm}$
 - le mallechort dont la résistivité est de $0,344 \mu\Omega \cdot \text{cm}$

Comparez ces résistivités à celle du cuivre qui est de $0,0179 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ou $1,79 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Ces résistances sont principalement utilisées lorsqu'il faut dissiper une puissance importante, par exemple pour les circuits électroniques de forte puissance, dans les alimentations, etc.

Les valeurs courantes vont de 0,1 à 22 kohms, la dissipation va de 1 à 250 Watts. Il existe aussi différents types de connexions : par fils à souder, par cosses à souder ou par cosses à visser.

³ En anglais **wirewound**

Pour les plus basses puissances (1 à 10 W) l'aspect d'une résistance bobinée ressemble fort à la résistance à couche (film) métallique, sauf qu'elle plus grosse, et que l'on voit nettement l'allure du bobinage dans la couche de protection qui est dans ce cas soit un vernis vitrifié ou un ciment réfractaire.

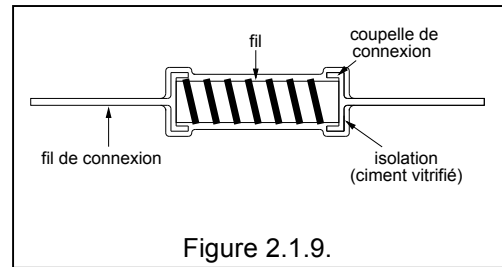


Figure 2.1.9.

Pour des puissances plus importantes, le corps de la résistance (voir fig. a) composé d'un support cylindrique en céramique sur lequel est bobiné le fil résistif et muni de ses coupelles de connexion est noyé dans un corps en céramique et celui-ci est rempli de ciment réfractaire. Voir figure b. Le fait d'augmenter le volume et la surface de contact avec l'air permet d'augmenter la dissipation. On trouve ainsi des résistances de 5 et 10 W, avec des valeurs courantes de 0,1 à 100 kohms.

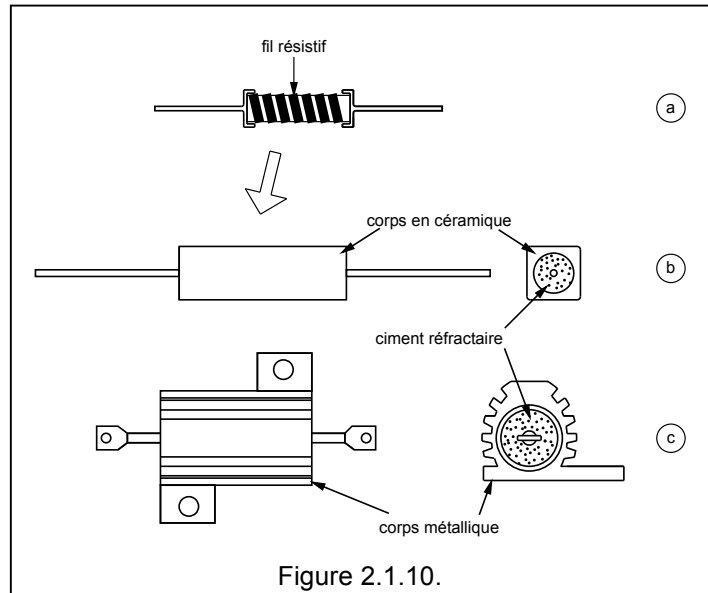


Figure 2.1.10.

Mais on peut aussi noyer l'élément résistif (fig. a) dans un corps métallique. Voir figure c. Cette résistance peut alors être fixé sur le châssis ou sur un refroidisseur (voir théorie des refroidisseurs plus loin). On trouve ainsi des résistances de 5, 10, 25, 50 et 100 Watts et des valeurs courantes de 0,1 à 10 kohms.

La figure ci-contre représente encore une autre variante. Le fil est bobiné sur un cylindre en céramique et le tout est recouvert d'un ciment réfractaire. Les connexions se font par des languettes. Si la résistance doit pouvoir être ajustée, le fil résistif est rendu visible et on utilise un collier afin d'ajuster la résistance. Les puissances vont de 5 à 500 W.

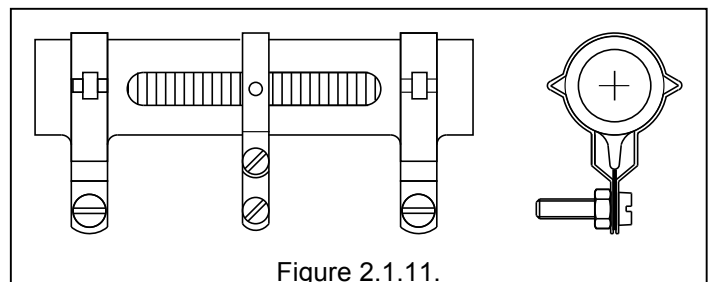


Figure 2.1.11.

Les résistances bobinées sont, après les résistances à couche métallique, les plus utilisées.

Par le fait même que la résistance est bobinée, elle présente une certaine self induction. La figure ci-contre représente une méthode de bobinage dite "en méandre" qui réduit considérablement la valeur de la self, toutefois cette méthode entraîne une capacité parasite importante.

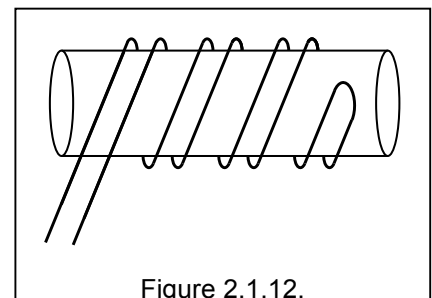


Figure 2.1.12.

- **Résistances en film épais** : Sur de la céramique on peut déposer par métallisation une couche de nickel-chrome pour former des résistances. La technologie des films épais offre une solution élégante pour faire des réseaux de résistance en boîtier SIL ("Single In Line package") au pas de 2,54 mm.

Ces résistances, sous forme de SIL, peuvent soit

- comporter "n" résistances ayant un point commun (figure a). Le point commun est repéré par un point de couleur sur le corps du composant. Le nombre de résistances varie de 4 à 9 par SIL, par conséquent le nombre de "pattes" est aussi variable. D'autre part en informatique on utilise souvent des résistances de polarisations encore appelées "pull-up" qui servent à porter les lignes d'un bus vers un potentiel (souvent le +5 V).
- soit comporter des "n" résistances isolées les unes des autres (figure b), Ces résistances en boîtier SIL sont très intéressantes pour réaliser un convertisseur analogique/digital ou digital/analogique, car on peut obtenir une bonne précision.

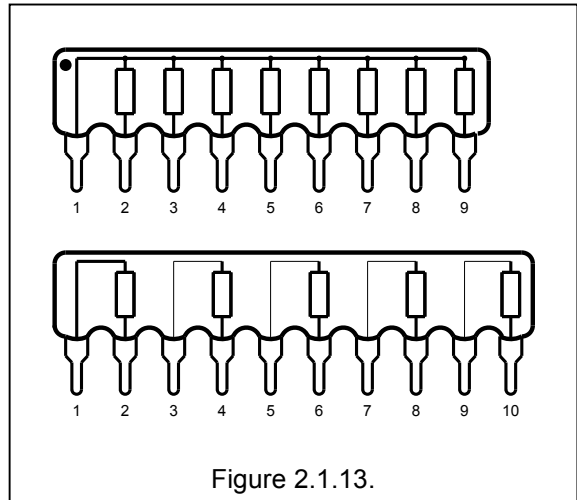


Figure 2.1.13.

Les valeurs vont de 10 ohms à 1 Mohms.

Avec cette technologie, on peut aussi réaliser des modules atténuateurs qui se présenteront sous forme d'une petite plaquette avec 3 ou 4 fils, la valeur de l'atténuation (0,1 à 25 dB), l'impédance nominale (50, 75, 150, 300 ou 600 ohms). L'avantage est que ces atténuateurs ont une très grande précision.

- **Résistances CMS** : Voir le paragraphe consacré aux "Composants à Montages de Surface" (Surface Mounted Components ou SMC).

Pour faire une résistance CMS on part d'un support en céramique, sur lequel on dépose un film métallique. Ce film est connecté à deux terminaisons.

Une résistance CMS est capable de dissiper 0,1 W et mesure 1,5 mm x 3 mm, parfois un peu moins. On trouve les valeurs de 1 ohm à 10 Mohm. La série standard est la E24 (5%). Les résistances CMS se présentent sous forme d'un petit parallélépipède avec deux côtés soudables.

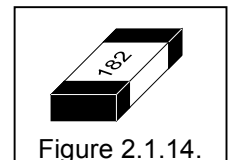


Figure 2.1.14.

2.1.5.2. Les résistances réglables

- **Potentiomètres au graphite** : La piste du potentiomètre peut être peinte ou moulée. L'épaisseur, la largeur ou la composition de la piste peut varier et modifier donc la loi de variation en fonction de l'angle.

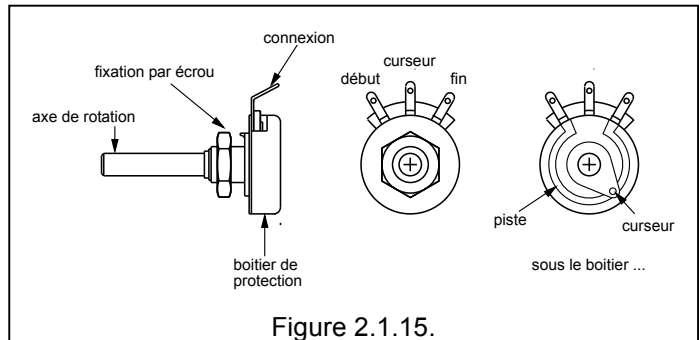


Figure 2.1.15.

La figure ci-contre montre les types de variations. On trouve des potentiomètres à

- variation **linéaire** et cette variation est repérée par la lettre **A** qui suit la valeur (par exemple 47 k A)
- variation **logarithmique droite** qui sont utilisés pour les réglages de volume audio, ils sont donc très utilisés, et ils sont repérés par une lettre **B**
- variation **logarithmique gauche**, ils sont beaucoup moins fréquents
- variation en **courbe en S**.

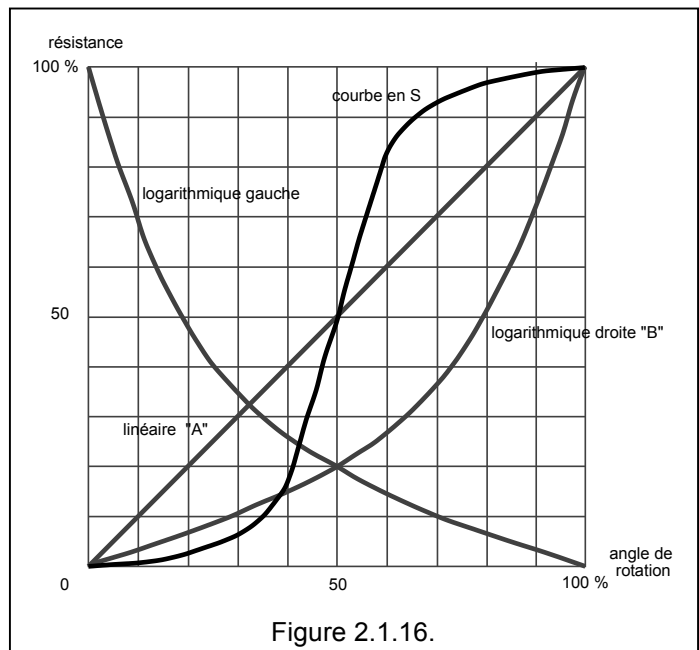


Figure 2.1.16.

On trouve des modèles normaux ronds (angle de rotation env. 300°) ou des modèles à glissière (principalement utilisés dans les pupitres de mixage audio), des boîtiers étanches ou non, des modèles simples ou doubles (pour la stéréo), des modèles avec ou sans interrupteur, différents types de connexions (à souder normales, pour circuit imprimé, ...).

Les valeurs standard vont de 100 ohms à 4,7 Mohms.

- **Potentiomètres d'ajustage à piste de carbone**: Ils sont principalement utilisés pour le réglage d'un montage en usine, en principe ils ne sont pas accessibles à l'utilisateur de l'équipement.

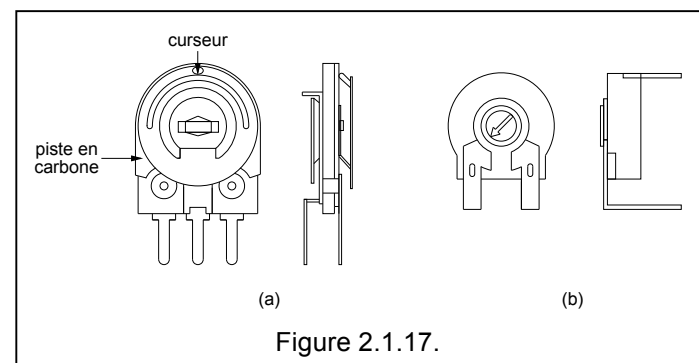


Figure 2.1.17.

Il existe différents modèles, ils sont destinés soit pour montage horizontal ou pour un montage vertical, et les connexions sont généralement au pas de 2,54 mm.

Valeurs de 100 ohms à 2,2 Mohms, dissipation de 0,1 à 0,5 Watt.

- **Potentiomètre d'ajustage multitours** (10 à 20 tours) : Ils sont utilisés lorsque la précision de la position du curseur d'un potentiomètre d'ajustage normal (300° ou "1 tour") n'est plus suffisante. Ils sont également disponibles sous différents modèles : rectangulaire ou carré, pour montage vertical ou horizontal, les connexions généralement au pas de 2,54 mm. Les valeurs vont de 10 ohms à 2 Mohms, la dissipation va de 0,1 à 0,5 Watt.

2.1.5.3. Les résistances non linéaires

Il existe quelques types de résistances spéciales dont la valeur dépend d'autres paramètres ...

- **Thermistances ou résistances à coefficient de température négatif ou CTN⁴** :

Elles sont fabriquées avec des oxydes semi-conducteurs tels que Fe₂O₄, Fe₂O₃, NiO ou CoO. La relation entre la résistance d'une CTN et la température de la résistance CTN est approximativement $R = A e^{(B/T)}$ où A et B sont des constantes caractéristiques (voir figure ci contre).

Les applications principales des CTN sont :

- limitations du courant de pointe pour une alimentation, à température ambiante (20°C) la CTN va par exemple avoir une résistance de 2 Ω et elle va limiter le courant dans le circuit à 220V ~ tandis que lorsqu'elle sera à température plus élevée (par exemple 80° à 100°C) sa résistance va diminuer à 0,01 Ω
- stabilisation de tension
- sonde thermométrique

On trouve des CTN sous formes :

- de disques (figure a),
- montée sur boulon, particulièrement intéressant pour la mesure de température de masse métallique (un refroidisseur de transistor par exemple) (figure b)
- perles montées sous vide, qui sont utilisées pour la mesure de température de liquide et de gaz (figure c).

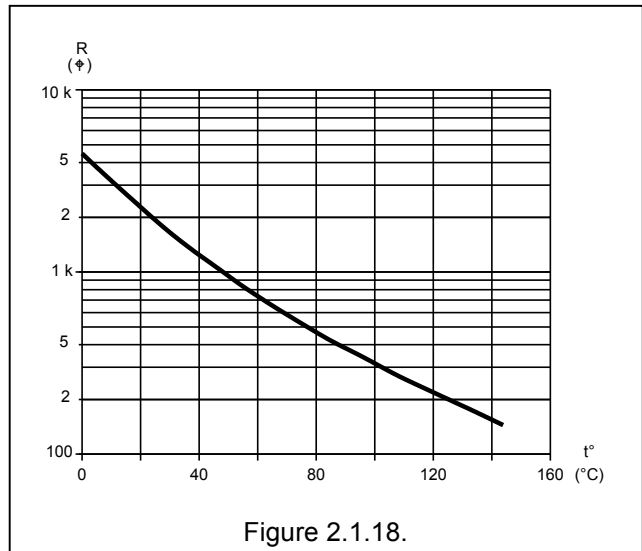


Figure 2.1.18.

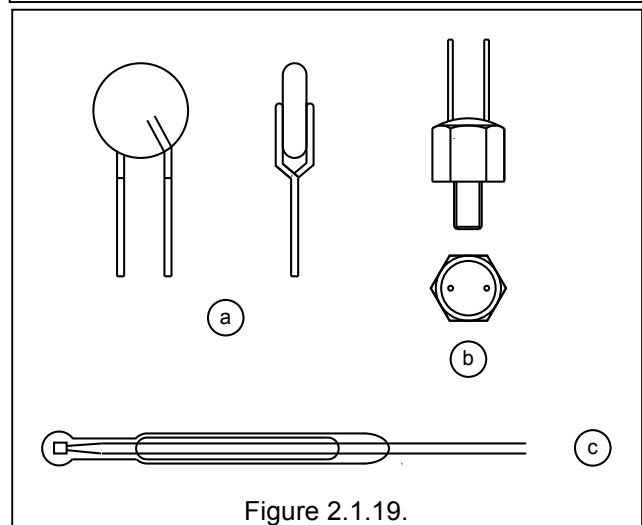


Figure 2.1.19.

Le symbole d'une CTN est semblable à celui d'une résistance auquel on ajoute un trait oblique pour indiquer une rupture de linéarité et "-t" pour indiquer que c'est avec la **température** et de manière **négative**.

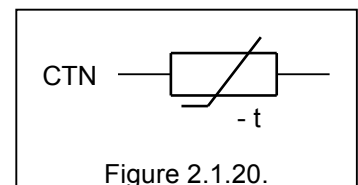


Figure 2.1.20.

⁴ En anglais NTC ou thermistor

- **Résistances à coefficient de température positif ou CTP :**
Elles sont caractérisées par une variation très brutale de leur résistance à une température donnée. Elles peuvent être utilisées comme dispositifs de protections contre les échauffements.

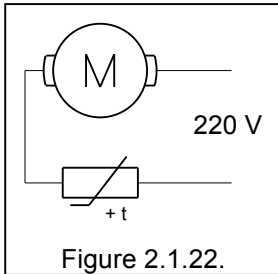


Figure 2.1.22.

Les résistances CTP sont montées en série avec l'élément à protéger et sont disposées à l'endroit le plus critique (c-à-d "où cela chauffe").

La figure ci-contre montre également le symbole d'une résistance CTP.

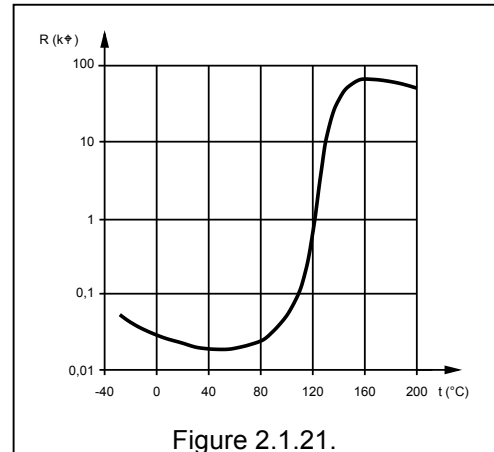


Figure 2.1.21.

- **Varistances ou VDR ou MOV :**
Elles se composent d'un agglomérat de cristaux de carbure de silicium. C'est une résistance dont la valeur dépend de la valeur de la tension électrique appliquée

Ce sont des résistances pour lesquelles il existe une non linéarité entre la résistance électrique et la tension appliquée.

La relation entre le courant et la tension est de la forme $U = C I^\beta$. Pour la partie utile de la courbe, ce coefficient β vaut environ 38. La loi d'Ohm⁵ n'est donc plus d'application ici ! Elles se présentent sous formes de bâtonnets ou de disques.

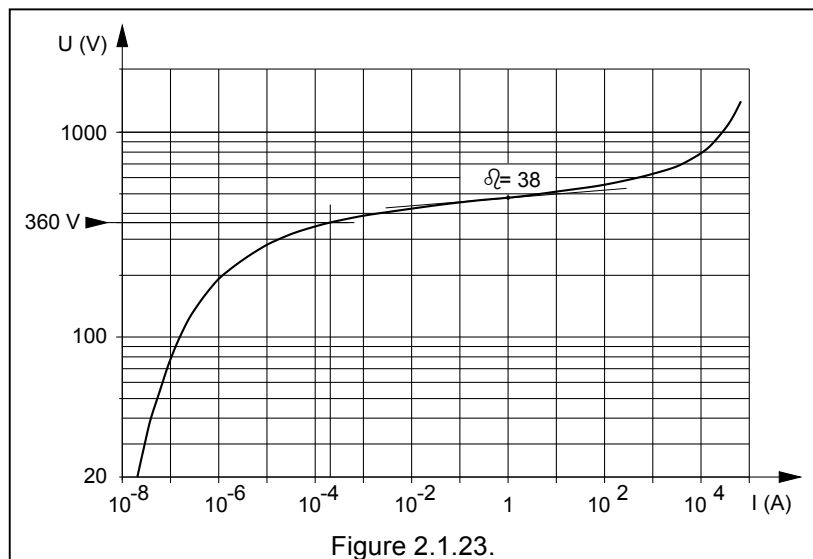


Figure 2.1.23.

Une variété de VDR est connue sous l'appellation **MOV** pour Metal Oxyde Varistor. L'application principale de cette résistance est la protection contre les surtensions, dans ce cas la résistance est en parallèle sur les bornes d'entrées et après le(s) fusible(s) de protection (voir figure 2.1.24).

La figure 2.1.23 donne la courbe d'une résistance MOV prévue pour une protection à 250 V. A la tension nominale (la tension de crête du 220 V + 10 %, soit 360 V), le courant est de l'ordre de 0,2 mA, tandis que pour 550 V crête (soit 400 V_{eff}) le courant atteint 100 A ! Ce qui doit (normalement) conduire à la fusion (presque) immédiate du fusible de protection. Toutefois, si le fusible est surdimensionné, la MOV va se mettre définitivement en court-circuit, il faudra donc parfois remplacer les MOV. Il vaut mieux remplacer une MOV que d'avoir tout un équipement détruit par une surtension.

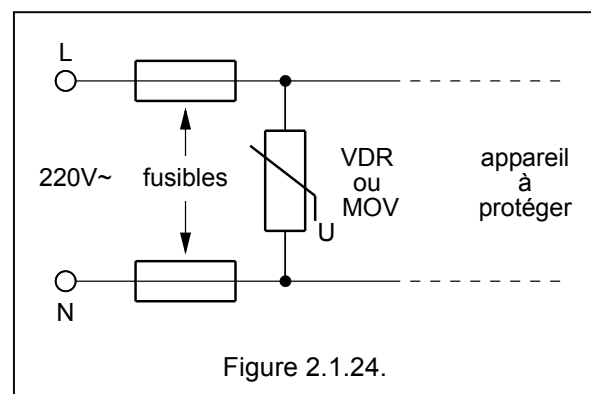


Figure 2.1.24.

⁵ Pour les résistances "normales" qui répondent à la loi d'Ohm, β serait égal à 1 !

- **Les photo résistances ou LDR** (Light Depending Resistors) : Ce sont des résistances à base de sulfure de cadmium avec une petite fenêtre transparente et dont la valeur varie en fonction de l'éclairement habituellement de 75 à 300 Ω pour 1000 lux à quelques 10 M Ω dans l'obscurité. Elles sont utilisées pour réaliser des automates d'éclairage, des détecteurs de passage ou des détecteurs de flammes.

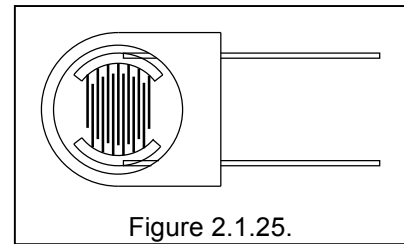


Figure 2.1.25.

2.1.5.4. Les résistances spéciales

- **Les ampoules d'éclairage en tant que résistance** : Dans certains cas on peut employer des ampoules d'éclairage comme résistances, par exemple pour tester une alimentation ou pour décharger une batterie. Il ne faut toutefois pas oublier que les ampoules à filament métallique ont un très fort coefficient de température et que l'appel de courant à la mise sous tension peut atteindre jusqu'à 10 x la valeur nominale du courant. Il peut dès lors être impossible de "charger" une alimentation en test au courant maximum, puisque l'enclenchement de la lampe provoque une pointe de courant que l'alimentation détecte et qui la met en position de sécurité. Par contre, si on utilise des ampoules à filament de carbone (ces ampoules se trouvent assez difficilement !), le coefficient de température est négatif et le phénomène est juste l'inverse !
- **Antennes fictives, charges et atténuateurs** : Pendant que l'on effectue des tests sur des émetteurs, il n'est pas souhaitable que la puissance HF soit envoyée "on the air". C'est pourquoi on remplace l'antenne par une résistance de 50 ohms appelée antenne fictive ou "charge" ("dummy load").

Comme il s'agit de "résistance", nous avons classé les antennes fictives et les atténuateurs dans cette partie du cours.

Ces **charges** peuvent supporter de 5 à 1000 Watts (voire beaucoup plus pour d'autres applications). Elles sont constituées d'une résistance à faible inductance et à faible capacité parasite, elles sont terminées par une fiche coaxiale normalisée (fiche UHF, type M ou type N) (figure a) et sont munies d'un refroidisseur à ailettes afin d'évacuer la chaleur dégagée dans l'air ambiant. Pour faciliter l'évacuation de la chaleur, la résistance est parfois mise dans un

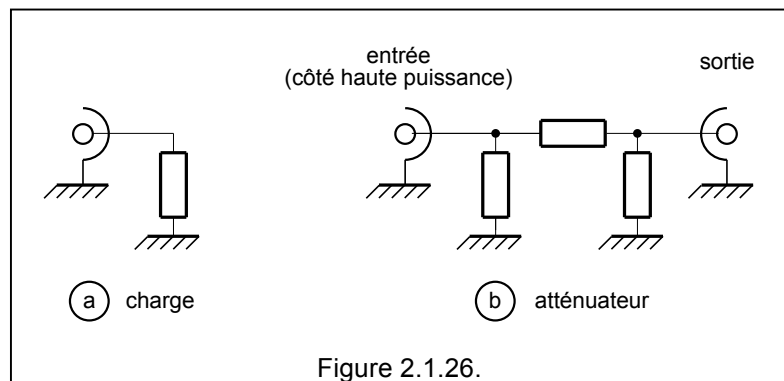


Figure 2.1.26.

bain d'huile, mais on peut aussi utiliser un ventilateur ou des moyens plus sophistiqués pour évacuer la chaleur. Sur la photo ci-contre il y a une charge de 1000 watts, avec wattmètre incorporé, et pouvant être utilisé jusqu'à 30 MHz et une autre charge pour 150 watts maximum.

Enfin une variante de la charge est l'**atténuateur** (figure b), selon la même technique, on réalise un atténuateur (10 à 40 dB), ceci permet de récupérer une faible partie du signal pour le transmettre à un appareil de mesure (par exemple un fréquencemètre ou un analyseur de spectre).

Un atténuateur possède donc deux fiches coaxiales, alors qu'une simple charge n'en possède qu'une.

Pour les puissances faibles (jusqu'à 2 W environ) la charge l'atténuateur se présente comme une fiche por câble coaxial ou comme "transition". Pour des puissances plus élevées, la masse métallique est plus importante et la charge ou l'atténuateur est pourvu d'ailettes de refroidissements.

Certains atténuateurs sont asymétriques, c'est-à-dire qu'un seul des deux côtés est capable de supporter la puissance élevée, mais bien sûr, si on n'applique qu'une faible puissance, ils sont tout à fait réversibles et possèdent la même atténuation dans un sens que dans l'autre.

Une charge ou un atténuateur sont caractérisés par

- l'impédance nominale (très souvent 50 Ω)
- la puissance maximum
- la gamme de fréquence
- et, pour un atténuateur, l'atténuation

Citons deux fabricants d'atténuateurs et de charges :

Narda (voir <http://www.nardamicrowave.com/east/index.php?m=Products&e=section§ionId=2>)

et Bird (voir <http://birdtechnologies.thomasnet.com/viewitems/all-categories-attenuators/rf-coaxial-attenuators?&forward=1>)

2.1.5.5. Résumé

Pour spécifier une résistance, il faut donner sa **valeur** (en Ω), la **tolérance** (en %) sur cette valeur, sa **dissipation** (en **Watts**), et son **type** selon le tableau suivant :

Résistances fixes ...			les plus utilisés
agglomérées	"pour mémoire".		
à couche métallique	usage général	1 ohm à 22 Mohms 1/8 Watt à 3 Watts	XX
bobinées	pour de fortes puissances mais pas pour la HF !	0,1 à 22 kohms 1 à 250 Watts	X
bobinées isolées à boîtier métallique		0,1 à 10 kohms 1 à 100 Watts.	X
en film épais	réseaux de résistances atténuateurs	4 à 9 par SIL 10 ohms à 1 Mohms.	
CMS	les résistances les utilisées actuellement !!!	1 ohm à 10 Mohm 0,1 W	XX
Potentiomètres ...			
au graphite	linéaire ("A"), logarithmique droite ("B"), logarithmique gauche, courbe en S	100 ohms à 4,7 Mohms.	X
hélicoïdaux multitours		100 ohms à 100 kohms	
d'ajustage à piste de carbone		100 ohms à 2,2 Mohms 0,1 à 0,5 Watt.	X
d'ajustage multitours (10 à 20 tours)		10 ohms à 2 Mohms 0,1 à 0,5 Watt.	X
bobinés		de 1 ohm à 200 kohms. 2 à 500 Watts	
rhéostats	forme de potentiomètres, mais sans 3eme connexion	0,1 ohm à 10 kohms jusque 1kW.	
Résistances spéciales ...			
thermistances ou résistances à coefficient de température négatif ou CTN	coefficient de température négatif		
varistances ou VDR	la valeur de la résistance dépend de la tension		
résistances à coefficient de température positif ou PTC	protections contre les échauffements		
les photo résistances ou LDR (Light Depending Resistors)	la valeur de la résistance dépend de l'éclairement (la lumière)		
les ampoules d'éclairage en tant que résistance			
antennes fictives, charges et atténuateurs	"dummy load"		

2.1.6. Les résistances en alternatif - Effet de pelliculaire.

Enfin, lorsqu'une résistance est utilisée en haute fréquence, la distribution du courant à l'intérieur du conducteur n'est plus uniforme comme elle l'était en courant continu. La densité de courant (représenté par la lettre J) diminue de l'extérieur vers l'intérieur du conducteur, et la résistance du conducteur augmente c'est l'**effet pelliculaire** ("skin effect").

On peut déterminer une profondeur de pénétration qui serait l'épaisseur dans laquelle passerait la majorité (63 %) du courant. Pour un conducteur cylindrique en cuivre, on peut calculer la profondeur de pénétration par la formule

$$\delta_{(mm)} = 67 \sqrt{1 / f_{(Hz)}}$$

Calculons la profondeur de pénétration δ pour quelques fréquences...

fréquence	$\delta =$
50 Hz	9,5 mm
1 kHz	2,1 mm
100 kHz	0,21 mm
1 MHz	0,067 mm
10 MHz	0,0212 mm
30 MHz	0,0122 mm
144 MHz	$5,6 \cdot 10^{-3}$ mm
432 MHz	$3,2 \cdot 10^{-3}$ mm
1296 MHz	$1,8 \cdot 10^{-3}$ mm
2304 MHz	$1,4 \cdot 10^{-3}$ mm

pour rappel : 10^{-3} mm = 1 micron !

Pour le courant industriel à 50 Hz, l'effet de peau ne se manifestera que pour des diamètres de l'ordre de 2 x 9,5 mm. Donc en pratique l'effet de peau ne joue pas.

Donc si on mesure la valeur d'une résistance avec un ohmmètre en courant continu, cette valeur sera encore valable en 50 Hz, elle sera encore valable à 1 kHz et même à 100 kHz, mais au delà la résistance sera beaucoup plus grande.

Si on travaille dans les gammes des ondes moyennes aux ondes courtes (100 kHz à 30 MHz) et que l'on a des diamètres de conducteurs important (en d'autres termes si on travaille avec des puissances importantes c.-à-d. > 100 Watts), on peut enlever la partie intérieure de ces conducteurs puisqu'il n'y passe (presque) pas de courant. On travaille donc avec des tubes en cuivre !

Si on travaille en VHF-UHF-SHF (300 à 3000 MHz), on peut diminuer la résistance des conducteurs, en déposant une couche d'argent de quelque 5 à 20 microns.

De plus une résistance présentera une certaine **capacité⁶ parasite** (essentiellement due à des "surfaces en regard" les unes par rapport aux autres) et une certaine **self parasite** (essentiellement due aux fils de connexion). Ces capacité et self parasites et l'effet de peau, font qu'en HF une résistance ne se comporte plus comme en courant continu ou en courant alternatif !

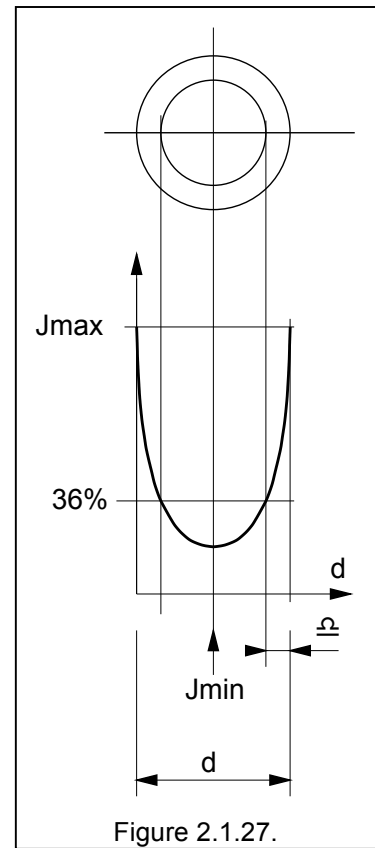


Figure 2.1.27.

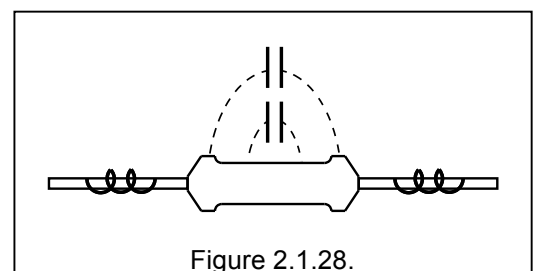


Figure 2.1.28.

⁶ Les notions de capacités et de self seront encore complétées dans les paragraphes suivants.

2.2. Les condensateurs

2.2.1. Généralités

Un condensateur est un composant qui a la particularité de pouvoir accumuler des charges électriques. Un condensateur se compose essentiellement de deux armatures, séparées par un diélectrique, chaque armature est reliée à une connexion.

Le diélectrique est un matériau isolant qui sépare les deux armatures du condensateur, et c'est précisément la nature de ce diélectrique qui constitue un critère de classification possible des condensateurs.

Un condensateur est caractérisé par sa capacité, c'est-à-dire la propriété d'un circuit électrique d'emmagasiner une certaine quantité d'électricité sous une certaine tension. La relation de base qui régit les condensateurs est

$$C = \frac{Q}{V}$$

où Q est la charge en Coulomb,
V est la tension en Volts

L'unité de capacité est le farad, symbolisé par F. Un condensateur d'une capacité de un Farad est un condensateur qui pourrait emmagasiner une charge de 1 Coulomb sous une différence de potentiel de 1 Volt.⁷

Mais les capacités utilisées habituellement sont assez faibles et on utilise les sous-multiples

- le **microfarad**, symbolisé par μF , $1\mu\text{F} = 1 \times 10^{-6}$ Farad,
- le **nanofarad**, symbolisé par nF, $1\text{nF} = 1 \times 10^{-9}$ Farad, et,
- le **picofarad**, symbolisé par pF, $1\text{pF} = 1 \times 10^{-12}$ Farad.

Il existe plusieurs symboles pour représenter un condensateur. Les symboles dépendent aussi parfois du type de condensateur (voir plus loin condensateur électrolytique etc. Mais le symbole ci-contre est le plus universel.

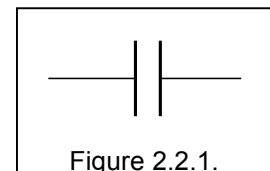


Figure 2.2.1.

⁷ Au début de la radio (dans les années 1920-1940) on a aussi utilisé comme unité de capacité le cm : le cm est la capacité d'un condensateur à vide constitué de deux armatures de 1 cm^2 et séparées de 1 cm. En fait $1 \text{ cm} = 1,1 \text{ pF}$! Si dans un vieux poste de radio vous trouvez un condensateur marqué 10000 cm, cela vaut donc 11 nF, sauf s'il s'agit d'un condensateur d'accord on arrondit, et dire que $1 \text{ cm} \approx 1 \text{ pF}$!

Mais ceci doit également permettre de dire que si on a deux armatures de $100 \times 50 \text{ mm}$, et espacées de 3 mm, la capacité sera égale à "à peu près" $10 \times 5 / 0,3 = 150 \text{ pF}$ (à 10 % près évidemment !).

2.2.2. Les facteurs qui déterminent la capacité

La valeur de la capacité d'un condensateur est déterminée par trois facteurs

- la capacité augmente avec la surface des électrodes (plaques)
- la capacité diminue lorsque la distance entre les électrodes (plaques) augmente
- la capacité dépend aussi de la nature de l'isolant c.-à-d. du diélectrique

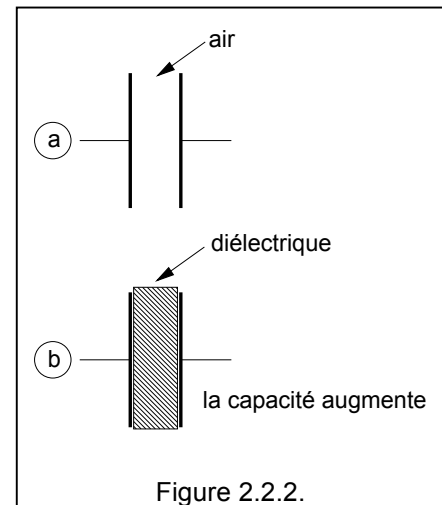
La relation de base qui régit les condensateurs est

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d}$$

où C est la capacité exprimée en Farad
 ϵ_0 est la constante diélectrique du vide = $1 / 36 \pi 10^9 = 8,84 \cdot 10^{-12}$ F/m
 ϵ_r est la constante diélectrique relative ($\epsilon_r = 1$ pour l'air)
 S est la surface des armatures en m²
 d est la distance entre les armatures en m

La constante diélectrique relative ϵ_r de quelques matériaux isolants :

	ϵ_r
air	1
téflon	2,1
polyéthylène	2,3
polystyrène	2,6
papier	3
quartz	3,8
verre (pyrex)	4,8
mica	5,4
porcelaine	5,1 à 5,9
verre (à vitre)	7,6 à 8



Pratiquement tous les matériaux ont dont un ϵ_r plus grand que 1, et toutes les valeurs se tiennent dans une fourchette de 2 à 8 environ ...

Donc si on a un condensateur à air et qu'on glisse entre les armatures un plaque de diélectrique (par exemple une plaque de verre ou un bloc de mica), la capacité va augmenter.

Ce qu'il faut surtout retenir c'est que

la capacité est proportionnelle à la surface des armatures, inversement proportionnelle à la distance entre armatures et, elle varie en fonction du diélectrique

2.2.3. L'énergie d'un condensateur

L'énergie est donnée par

$$E = 1/2 C U^2$$

$$\text{ou } E = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S U^2}{d} = \frac{\epsilon d S U^2}{2 d^2}$$

or $d \times S$ est le volume (V) entre les armatures et U^2/d^2 est le carré du champ électrique (F_e) d'où

$$E = 1/2 V F_e^2$$

En d'autres termes l'énergie d'un condensateur se trouve dans le diélectrique !

Applications :

Cachez la colonne avec les solutions et faites les exercices, puis comparez.

Problème :

- 1) Quelle est l'énergie dans un condensateur de 10.000 μF chargé sous 24 V ?
- 2) Quelle est l'énergie dans un condensateur de 10 μF chargé sous 5000 V ?
- 3) Deux barres d'un réseau ont 70 x 10 mm, elles sont espacées de 35 mm et ont une longueur de 100 m. La tension de service est de 6600 V. On interrompt la distribution sur le maximum de l'onde sinusoïdale. Quelle est l'énergie ?

solution :

$$E = 1/2 \times 10^{-2} \times 24^2 = 2,88 \text{ J}$$

$$E = 1/2 \times 10^{-5} \times 5000^2 = 125 \text{ J}$$

2.2.4. Le courant de fuite et les pertes

Il n'existe non plus pas de condensateur parfait, le diélectrique, n'est pas un isolant parfait, il y a une fuite que l'on peut représenté par une résistance en parallèle R_p . Cette R_p est le siège d'un courant I_R , et on définit l'angle de perte ou $\text{tg } \delta$ comme le rapport du courant dans la résistance I_R sur le courant dans le condensateur I_C :

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{R C \omega}$$

δ est appelé **angle de pertes** ou **facteur de dissipation**.

Cet angle de pertes (ou ce facteur de dissipation) doit être le plus petit possible.

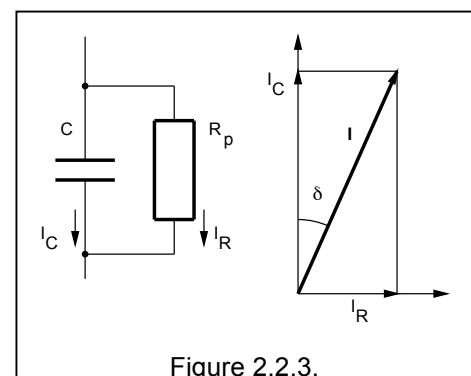


Figure 2.2.3.

2.2.5. Fonction des condensateurs

D'après le rôle joué par le condensateur dans le circuit on parle aussi de

- condensateur de **filtrage** s'il est destiné à réduire l'ondulation d'un montage redresseur (voir aussi plus loin au chapitre 3)
- condensateur de **couplage** ou de **liaison** s'il est destiné à laisser passer le courant alternatif (généralement le signal utile qui aura été amplifié) et à bloquer le courant continu,
- condensateur de **découplage** s'il est destiné à mettre virtuellement le courant alternatif à la masse par exemple,
- condensateur d' **accord** si en parallèle avec une self ou un quartz, il détermine la fréquence de résonance du circuit,
- condensateur de **démarrage** s'il est utilisé dans un moteur et sert à créer le déphasage nécessaire à la mise en mouvement du rotor,
- condensateur d'**amélioration du facteur de puissance** s'il est utilisé dans un système électrique à fort $\cos \varphi$.
- condensateur de **déparasitage** s'il sert à absorber les parasites, l'extra courant de rupture

En plus de sa capacité, une autre caractéristique d'un condensateur est sa tension d'utilisation.

2.2.6. Valeurs normalisées

Les arguments développés pour la standardisation des résistances restent encore valables ici, mais il faut toutefois remarquer que l'on se limite plus souvent à la série E12 (ou série à 10 %) tel que :

10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82
--

avec ses multiples et sous multiples.

Par contre pour des circuits oscillants, la précision peut être beaucoup plus grande. On trouve par exemple des condensateurs céramiques destinés à réaliser des transfos à FI avec une précision de 1% et des condensateurs styroflex destiné à réaliser des filtres BF avec une précision de 0,1 % (voir § 2.2.7.5).

2.2.7. Types de condensateurs

2.2.7.1. Les condensateurs à air

Il s'agit tout simplement de deux plaques de métal séparées par de l'air! Ces condensateurs sont caractérisés par de très faibles pertes et par un courant de fuite négligeable. Ces condensateurs sont essentiellement utilisés pour réaliser des condensateurs variables (voir plus loin) ou dans quelques applications HF spéciales où on n'a besoin de valeur relativement faibles (disons < 100 pF)

Pour des capacités de 0,1 μF les dimensions deviennent toutefois prohibitives et de plus la résistance mécanique de l'ensemble pose des problèmes.

Exercice : On veut faire un condensateur de 0,1 μF dont les plaques sont séparées de 0,1 cm. Calculez la surface des armatures?

Partant de $C = 8,84 \times 10^{-12} \times \epsilon_r \times S / d$, on trouve $S = C \times d / (8,84 \times 10^{-12} \times \epsilon_r)$ donc $S = 0,1 \times 10^{-6} \times 10^{-3} / 8,84 \times 10^{-12} = 11,3 \text{ m}^2$ soit une surface carrée de 3,36 m de côté et ceci avec un espace de 1 mm ! Bien sûr on pourrait par exemple mettre 10 plaques en parallèles, chacune espacée de 1 mm, on arriverait ainsi à 12 plaques de 1 m^2 ... imaginez cela pour faire un condensateur de 0,1 μF !

Remarque : si on met "n" plaques, la capacité sera égale à (n-1) x la capacité d'un seul élément !

Un des inconvénients est la fragilité mécanique, si les plaques sont déformées et que le condensateur est soumis à une forte tension c'est à ce point que l'arc jaillira⁸ !

2.2.7.2. Les condensateurs au mica⁹

Le mica est un minéral, c'est silicate double d'alumine et de magnésie. Le mica est clivé en mince lamelle, il est ensuite argenté. Valeur de 1,5 pF à 15 nF.

Ils sont utilisés dans les circuits d'accords où la fréquence doit être très stable. Ils sont principalement utilisés en HF.

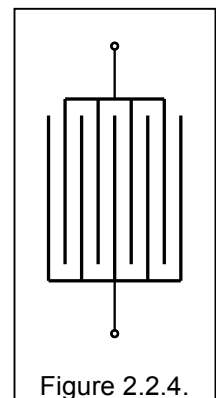


Figure 2.2.4.

⁸ De plus, grâce à Murphy, c'est toujours dans un condensateur à air que tombera la vis, l'écrou ou la rondelle métallique !!!

⁹ En allemand **glimmer**

2.2.7.3. Les condensateurs céramique

Ces condensateurs sont couramment comme condensateur de couplage, de découplage ou dans des filtres. Parmi ces condensateurs, on distingue les condensateurs tubulaires construits à partir d'un mince (0,3 mm) tube de céramique métallisé. Cette métallisation recouvre également la face interne du tube. La métallisation est coupée sur la partie externe et deux fils de connexions sont enroulés sur ce tube.

Toutefois une forme plus courante est les condensateurs disques. Un disque (de forme circulaire ou rectangulaire) est métallisé sur ses deux faces et 2 fils de connexions y sont fixé. Le tout est enrobé d'une couche de protection.

Philips classe ses condensateurs céramiques en 2 classes :

- classe 1 : Ils ont une très grande résistance interne, un bon facteur Q. Ils sont utilisés dans les oscillateurs et les filtres. Les valeurs disponibles vont de 0,47 pF à 270 pF. Le corps du condensateur est gris et le trait indique la valeur du coefficient de température
- classe 2 : Ces condensateurs ont une perte plus importante, ils sont utilisés comme condensateurs de couplage ou de découplage. Les valeurs vont de 180 pF à 47 nF. Au-delà de 1 nF, seule la série E3 (10, 22, 47, 100,...) est employée.

La tension de service va de 63 à 500 V selon les modèles. Le pas de montage est de 2,54 ou 5,08 mm.

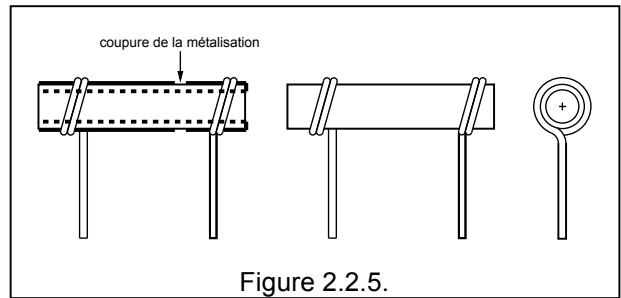


Figure 2.2.5.

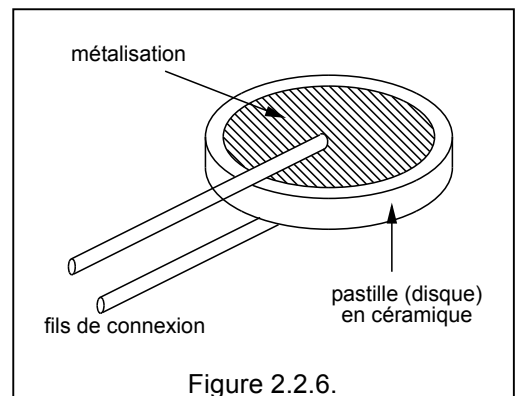


Figure 2.2.6.

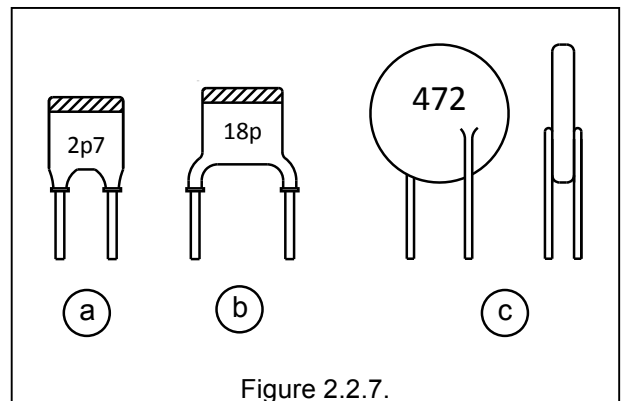


Figure 2.2.7.

2.2.7.4. Les condensateurs au papier

Il serait plus exact de parler de condensateur au papier imprégné, car le papier en lui-même n'est pas un très bon diélectrique, mais on dit généralement "condensateur au papier" pour simplifier. Le papier est donc imprégné de certaines cires, de paraffine ou d'huiles minérales ou végétales.

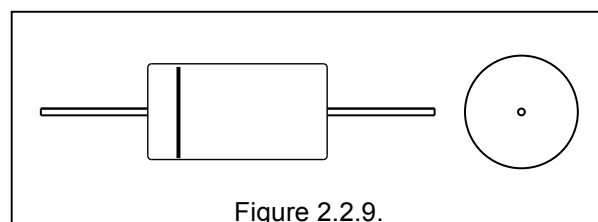
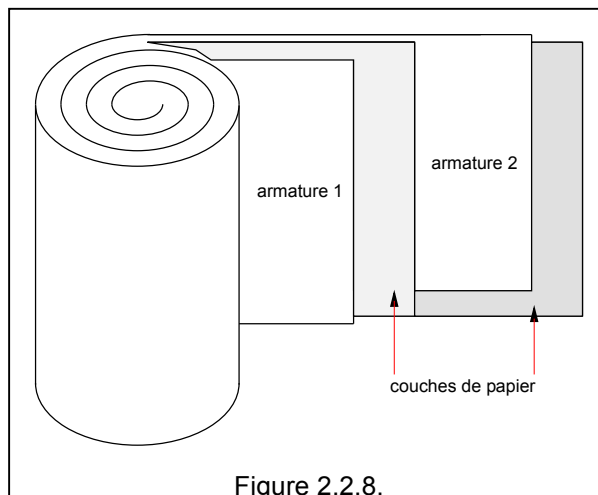
On trouve une armature constituée d'une feuille d'aluminium de 20 μm , une feuille de papier, une deuxième armature, et une deuxième feuille de papier. Le tout est enroulé. Remarquez que les armatures dépassent légèrement et chacune d'un côté du condensateur, sur ces parties qui dépassent seront fixées les fils de connexion.

Une variante consiste à métalliser le papier par une mince couche d'Al ou de Zn. L'aspect extérieur de ces condensateurs est représenté ci-contre. Le trait indique le côté qui est relié à l'armature la plus extérieure. Dans la mesure du possible la connexion du côté trait sera mise à la masse afin d'obtenir une sorte de blindage.

Les condensateurs au papier de très forte capacité (1 μF et plus) sont parfois enfermés dans des boîtiers métalliques.

On utilise parfois les lettres **MP** ("métal – papier") pour désigner ces condensateurs sur les schémas ou dans les listes de composants.

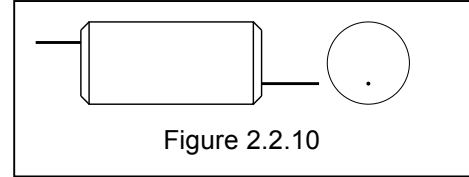
Mais ces condensateurs ne sont pratiquement plus utilisés.



2.2.7.5. Les condensateurs à film plastique métallisé

Ces condensateurs ressemblent aux condensateurs au papier, mais le diélectrique est constitué par un film plastique.

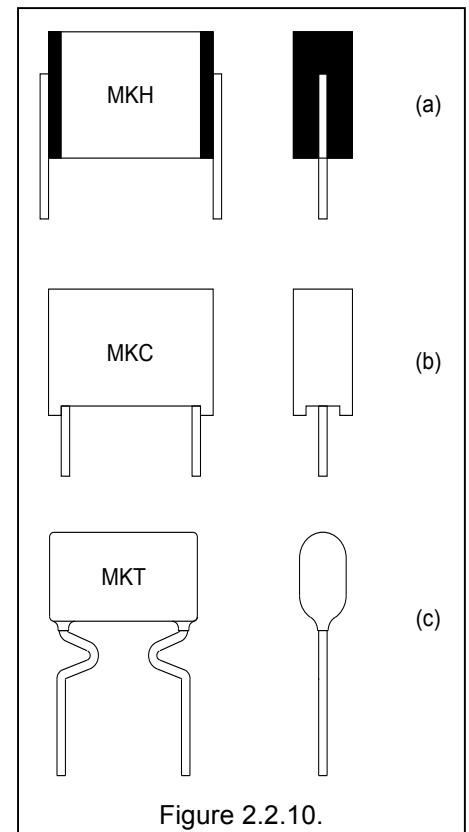
On distingue d'abord des condensateurs **styroflex** où le diélectrique est du polystyrène. Ils sont essentiellement utilisés dans les circuits d'accords, soit en basse fréquence, soit jusqu'à des fréquences de 500 kHz environ. Généralement la couche extérieure est translucide et on aperçoit juste en dessous de cette couche le début de la métallisation. Notez les sorties qui sont légèrement dissymétriques.



Puis viennent une série de condensateurs au polycarbonate désigné (codage DIN) par MKx. MK signifie "Metallisierte Kunststoff" ou matériau synthétique (= plastique) métallisé ou encore par FPx pour "Folie Kunststoff" c'est-à-dire feuille ou film synthétique.

Le x désigne plus exactement le type de diélectrique :

3ème lettre	description et usage
H = Téréphtalate de polyéthylène	Comme les condensateurs styroflex, d'apparence translucide on distingue immédiatement la couche métallisée. Les deux extrémités sont des métallisations sur lesquelles sont soudées (par point) les deux fils de connexion.
C = polycarbonate	Ces condensateurs ont une enveloppe en matière plastique, de couleur vive (différente suivant le fabricant). Utilisé essentiellement pour les couplages et découplages.
T = Téréphtalate de polyéthylène	Même diélectrique que pour les MKH, mais de fabrication différente: ces condensateurs sont protégés par une couche de peinture, et puisqu'ils sont formés par un enroulement de feuille de plastique, les bords sont arrondis.
S = polystyrol	circuit d'accord et filtres
P = polypropylène	
U = acétate de cellulose	



Tous ces condensateurs sont obtenus par enroulement de deux films plastiques métallisés. Les deux films métallisés sont enroulés avec un léger décalage latéral, afin que chacun d'eux dépasse d'un côté. Cette bordure est ensuite rabattue, puis métallisée, formant ainsi un contact avec toute la longueur du film enroulé ! Cette technique est encore appelée "shoopage".

2.2.7.6. Les condensateurs électrolytiques

On les appelle aussi condensateurs électrochimiques. Le symbole d'un condensateur électrolytique ou électrochimique est un peu particulier (voir figure ci-contre).

Les symboles des figures (a) et (b) sont les plus courants, toutefois on trouve aussi le symbole de la figure (c) dans d'anciens schémas européens et celui de la figure (d) dans d'anciens schémas américains.

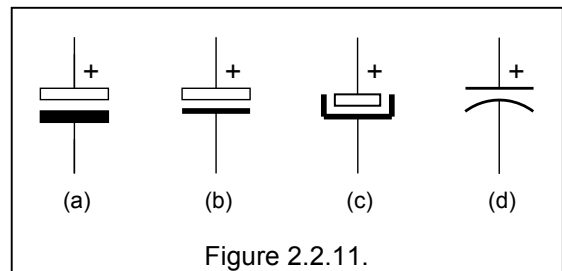


Figure 2.2.11.

Pour réaliser un condensateur électrolytique, on commence par préparer une **anode**, celle-ci est constituée d'une feuille d'aluminium de 20 à 40 µm, que l'on fait passer dans un bain d'acide borique, la feuille est portée à un potentiel positif par rapport à la cuve et il y a formation d'une couche d'alumine (Al₂O₃) sur l'aluminium.

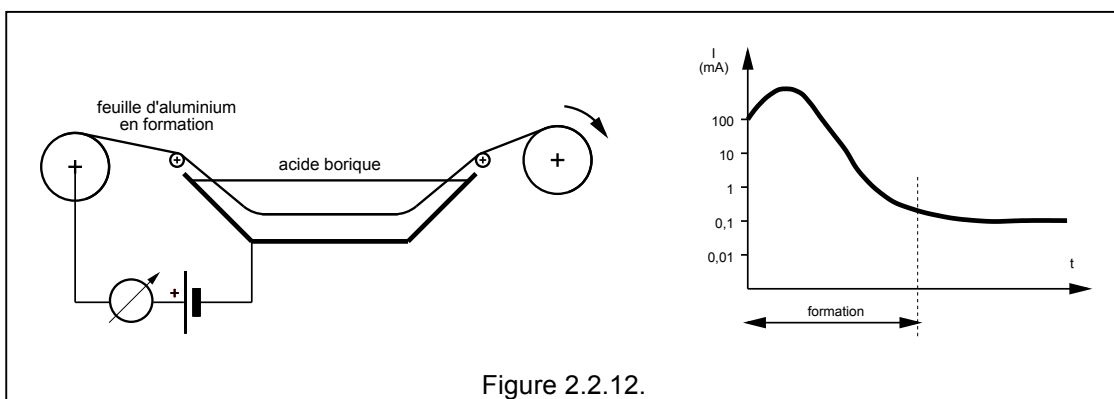


Figure 2.2.12.

Lorsqu'on met une simple feuille d'aluminium dans un bain d'acide borique, il faut un certain temps pour que le courant se stabilise (ordre de grandeur: 100 µA) on dit que l'électrode est alors formée. La longueur du bain d'acide borique et la vitesse de passage sont donc réglées pour que la feuille d'aluminium c-à-d l'anode soit correctement oxydée à la sortie.

L'anode peut être lisse ou gaufrée, cette dernière solution permet d'augmenter la capacité par unité de volume.

Lorsqu'on a une anode formée, on peut alors passer à l'étape suivante:

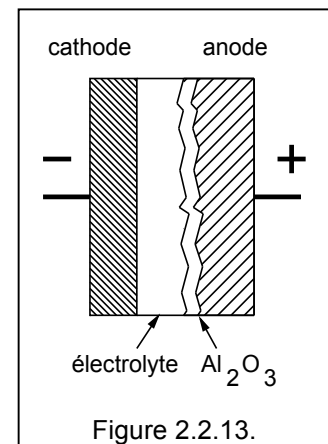


Figure 2.2.13.

On enroule ensuite cette anode avec une première couche de papier très absorbant, une feuille d'aluminium pur (qui constitue alors la cathode) et une deuxième couche de papier très absorbant. Le papier absorbant est imprégné d'un électrolyte (solution d'acide borique).

Le condensateur muni de ses fils de connexions est placé dans un cylindre en aluminium. Celui-ci est isolé par une feuille en plastic.

Valeurs courantes de 1µF à 220.000 µF. Tension de service : de 6 V à 500 V

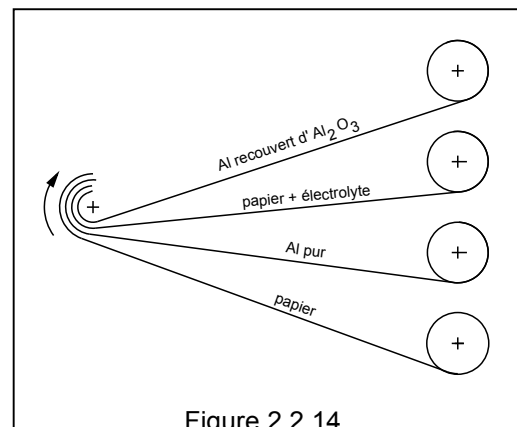


Figure 2.2.14.

On trouve

- des condensateurs électrolytiques à **sorties axiales** (voir fig a) qui peuvent éventuellement être repliés à 90°. Le conteneur en aluminium est le pôle négatif. La gorge marque le côté positif.
- des condensateurs électrolytiques à **sorties radiales** (les deux sorties du même côté), le fil le plus long correspond au "+" (fig. b). Le négatif est (de plus en plus) repéré par une bande avec des flèches et des signes "-" (fig. c)
- pour les très grosse capacité (10.000 μF et plus) le corps est gaufré de manière à permettre à l'électrolyte de se dilater (fig. d). Les bornes de connexions sont à vis (fig. e) ou à picots à soude (fig. f). La fixation peut aussi se faire par écrous (fig. g). Pour permettre à l'électrolyte de s'échapper sans faire "sauter" le condensateur, on prévoit aussi une soupape de sécurité.

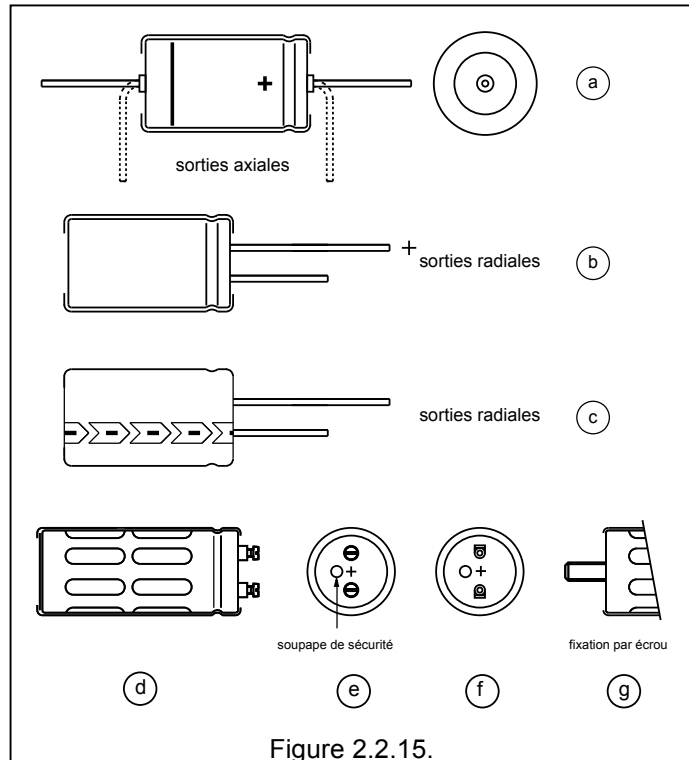


Figure 2.2.15.

Schéma équivalent d'un condensateur électrolytique

Le schéma équivalent d'un condensateur électrolytique est représenté ci-contre.

- R_{fuite} représente le courant dans l'électrolyte
- R_s représente la résistance série de la feuille d'aluminium et des connexions
- L_s représente la self série de la feuille d'aluminium et des connexions. Pour le courant continu cette L_s est négligeable.

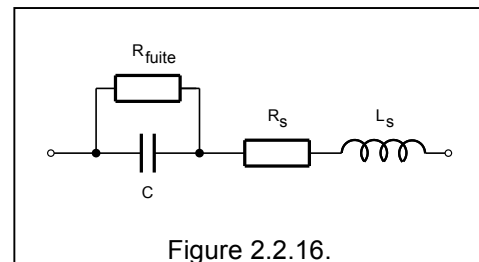


Figure 2.2.16.

Lorsqu'un condensateur électrolytique sera parcouru par un courant dont la plage de fréquence est relativement large, il est conseillé de placer en parallèle un second condensateur dont le comportement aux hautes fréquences est meilleur. Les condensateurs électrolytiques de filtrage sont ainsi souvent doublés d'un condensateur de 0,1 μF céramique.

Que se passe-t'il si on inverse les polarités d'un condensateur électrolytique ?

Si on inverse les polarités, la couche d'oxyde commence d'abord à se diluer dans l'électrolyte, un courant de plus en plus important prend naissance dans l'électrolyte, il y a augmentation de la température et finalement explosion du condensateur !



Condensateur électrolytique pour le courant alternatif :

Il existe cependant des condensateurs électrolytiques pour le courant alternatif (démarrage de moteurs et filtres pour haut parleur) que l'on appelle "**non polarisé**". Dans ce cas on utilise deux anodes (c-à-d deux feuilles d'aluminium oxydées) au lieu d'une seule. On trouve alors souvent les lettres "NP" sur le condensateur indiquant qu'il est non polarisé.

Vieillessement des condensateurs électrolytiques:

Le problème majeur est l'évaporation de l'électrolyte, d'où une diminution de la capacité. On dit que le condensateur est "desséché". La durée de vie typique est de 15 ans à 45°C et de 2000 h (83 jours) à 105°C!

Si un condensateur électrolytique est resté longtemps sans être utilisé, le courant de fuite peut être important, et ce courant peut provoquer la surchauffe, le claquage ou même carrément l'explosion.

2.2.7.7. Les condensateurs au tantale

Il s'agit d'une sorte de condensateur électrolytique dont le diélectrique est du Ta_2O_5 , qui est peu sensible aux impuretés et a un faible courant de fuite. Le symbole est le même que pour les condensateurs électrolytiques.

On trouve différentes formes, notamment en fonction de la capacité. La forme de la fig. c est appelée "goutte".

Avantages : Faible encombrement, grande stabilité et durée de vie, courant de fuite très faible,

Valeurs courantes: de 1 μF à 100 μF , tension de service de 6,3 V à 35 V.

Tout comme pour les condensateurs électrolytiques, il faut respecter la polarité sinon c'est l'explosion ...

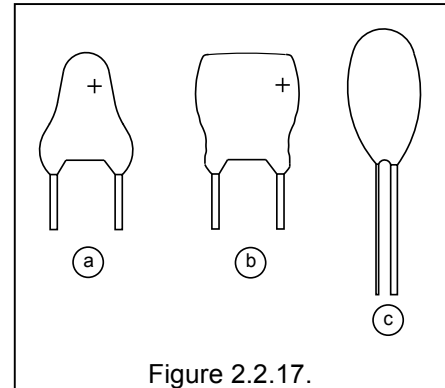
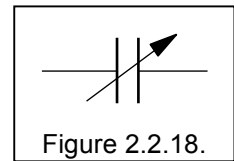


Figure 2.2.17.



2.2.7.8. Les condensateurs variables

Pour indiquer que le condensateur est variable, le symbole du condensateur est accompagné d'une flèche. On utilise aussi les lettres **CV** pour désigner un condensateur variable.

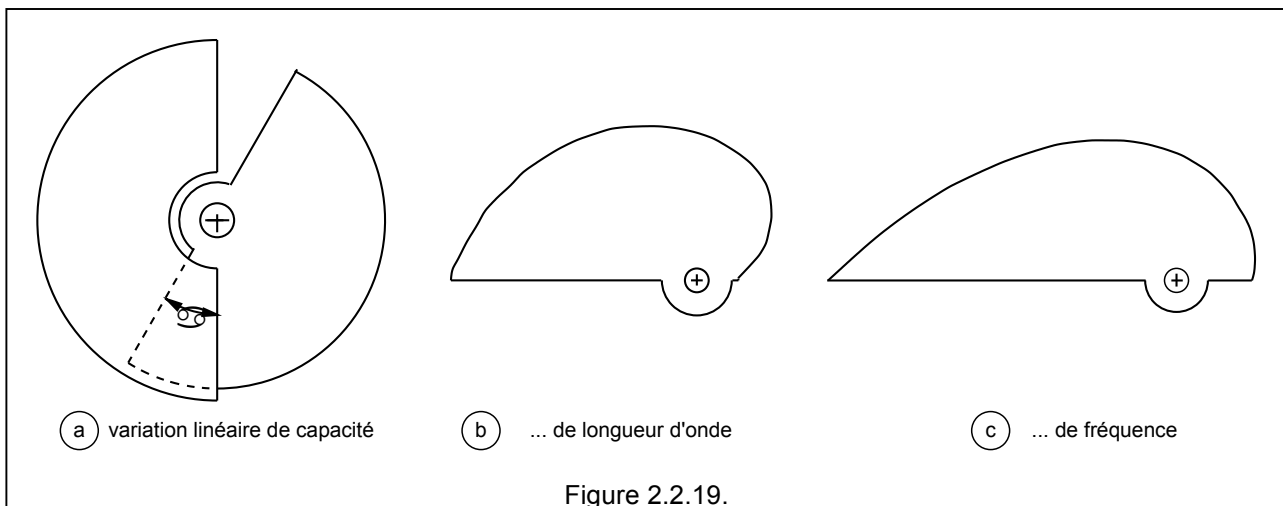


On distingue deux façons de réaliser la variation de capacité: la variation de surface et la variation de diélectrique.

Un condensateur variable est caractérisé par

- la capacité maximum, lorsque les lames mobiles offrent un maximum de surface en regard des lames fixes,
- la capacité minimum ou capacité résiduelle, lorsque les lames mobiles offrent un minimum de surface en regard des lames fixes
- la loi de variation de la capacité en fonction de l'angle de rotation.
- la tension nominale : pour un oscillateur local variable une tension de 50 V est généralement suffisante, mais pour l'étage de sortie d'un émetteur à tubes, une tension nominale de l'ordre de 1000 V est souvent nécessaire. Cette tension est fonction de l'espacement entre les lames.

La forme des plaques, va déterminer la loi de variation de la capacité en fonction de l'angle, on distingue ainsi les condensateurs variables à variation linéaire de capacité, à variation linéaire de longueur d'onde et à variation linéaire de fréquence.

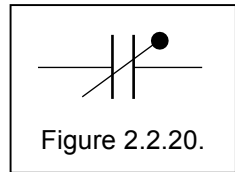


Plus particulièrement pour les amplificateurs à tubes, et pour les coupleurs d'antenne de forte puissance, il faudra aussi tenir compte de la tension de service qui est fonction de l'espacement entre les lames.

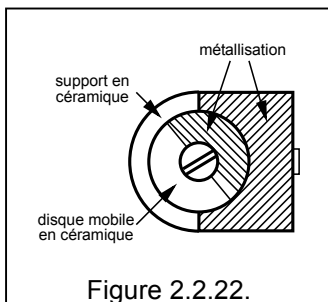
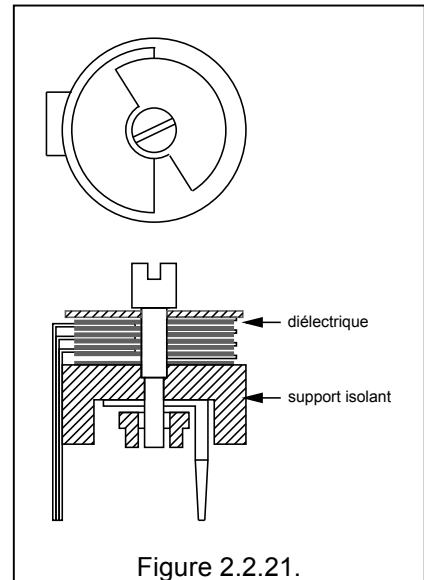
Généralement le rapport entre la capacité résiduelle (capacité minimum) et la capacité maximum est de 1 à 10. Par conséquent comme $f = 1 / (2 \pi \sqrt{L C})$, le rapport entre la fréquence maximum et la fréquence minimum est de $\sqrt{10}$ soit 3,16 .

2.2.7.9. Les condensateurs ajustables

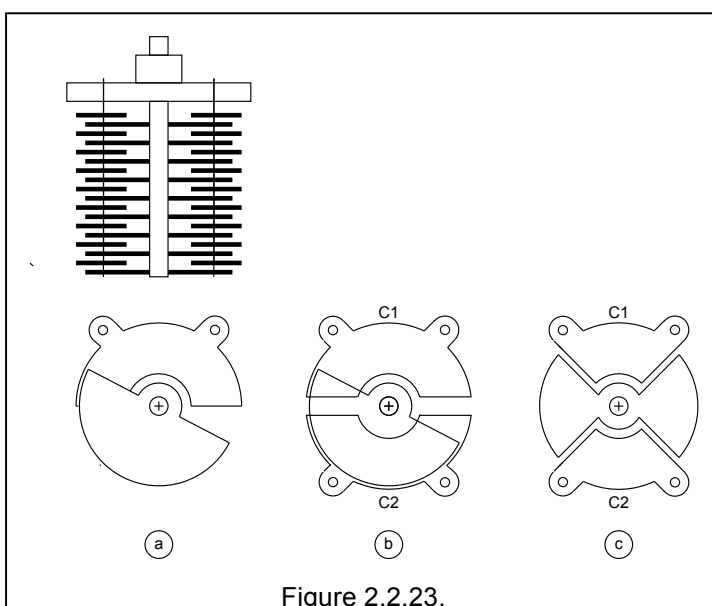
Pour indiquer que le condensateur est ajustable, le symbole du condensateur est accompagné d'un trait avec un point. Ils servent à régler les circuits accordés, les transfos à FI, etc



Dans le modèle ci-contre le diélectrique est constitué de minces feuilles de polytétrafluoréthylène. Ces condensateurs sont essentiellement utilisés dans les récepteurs. Le diamètre varie de 5 à 10 mm. Les capacités nominales (maximum) varient entre 5 et 40 pF. La tension de service n'exécède pas 100 V.



Le modèle de condensateur ci-contre utilise la céramique comme diélectrique. Le support et le disque mobile sont métallisés sur une partie de leur surface. Ils ont une taille de 15 mm environ. Les capacités nominales varient de 10 et 100 pF. La tension de service maximum est de 500 V.



On trouve également des condensateurs ajustables à air. Ils ressemblent fort aux condensateurs variable.

Notons la figure b où C1 augmente lorsque C2 diminue

La figure c représente un condensateur appelé condensateur "papillon" ou "butterfly" utilisé dans des montages symétriques. C1 et C2 varient de la même manière.

2.2.7.10. Les condensateurs de passages

Ces condensateurs sont destinés à filtrer des signaux continus ou BF lorsqu'ils passent d'un milieu généralement quelconque vers l'intérieur d'un boîtier blindé. Ils se présentent sous forme d'un boulon que l'on fixe sur la paroi (figure a) ou sous forme d'un tube de céramique métallisé que l'on soude sur la paroi (figure b). Le choix des valeurs est assez restreint et s'étend de 100 pF à 10 nF environ. La tension de service peut atteindre plusieurs centaines de Volt, et la tolérance et le coefficient de température sont sans grande importance pour cette application.

Ici aussi, le symbole est un peu particulier (figure c), il évoque en fait le petit tube qui fait capacité et qui passe "au travers" d'un châssis.

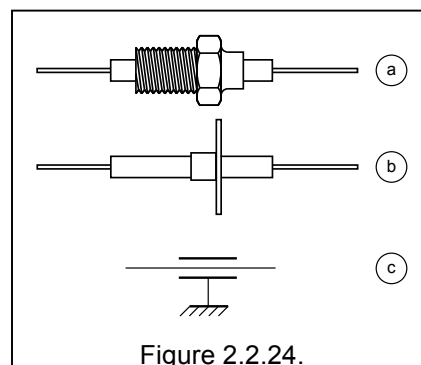


Figure 2.2.24.

2.2.7.11. Les condensateurs CMS

Lorsque nous avons parlé des résistances, nous avons mentionné la technologie CMS. Tous les condensateurs n'existent pas en technologie CMS, par exemple les gros condensateurs de filtrage n'ont pas besoin d'être dans cette technologie miniature, de même que les condensateurs de démarrage, les condensateurs de passage, etc ...

Par contre, pour l'électronique, on trouve dans cette technologie CMS des condensateurs

électrolytique de 1 à 68 μ F
céramique de 0,47 pF à 10 nF

Les condensateurs CMS (tout comme les résistances CMS) se présentent sous forme d'un petit parallélépipède avec deux côtés soudables. Ces condensateurs peuvent être réalisés en plusieurs technologies, il existe donc des condensateurs CMS utilisant des films métallisés, d'autres sont des céramiques métallisés, ou d'autres sont des tantales ou des électrochimiques

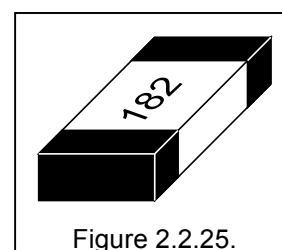


Figure 2.2.25.

2.2.7.12. Résumé

Pour spécifier un condensateur, il faut donner sa **valeur** (en μF , en nF ou en pF), la **tolérance** (en %) sur cette valeur, sa **tension de service** (en **Volts**) , et son **type** selon le tableau suivant :

condensateur		les plus utilisés
à air	faibles pertes et courant de fuite négligeable. condensateurs variables applications HF spéciales	
au mica	circuits d'accords où la fréquence doit être très stable	
styroflex	circuits d'accords, en basse fréquence et jusqu'à 500 kHz environ.	
céramique	2 classes: classe 1 : assez stables et précis : pour oscillateurs et les filtres. classe 2 : cond. de couplage ou de découplage. Valeurs de 180 pF à 47 nF.	xx
au papier		
au papier métallisé		
film plastique métallisé M K x	S = polystyrol pour circuit d'accord et filtres P = polypropylène C = polycarbonate pour couplage et découplage T = polyterefalate U = acétate de cellulose	xx
électrolytiques	Valeur de $1\mu\text{F}$ à 220.000 μF . Tension de service : de 6 V à 500 V	xx
tantale		
ajustables		x
de passage		
CMS	électrolytique :de 1 à 68 μF céramique : de 0,47 pF à 10 nF	xx

2.2.8. Le condensateur en alternatif

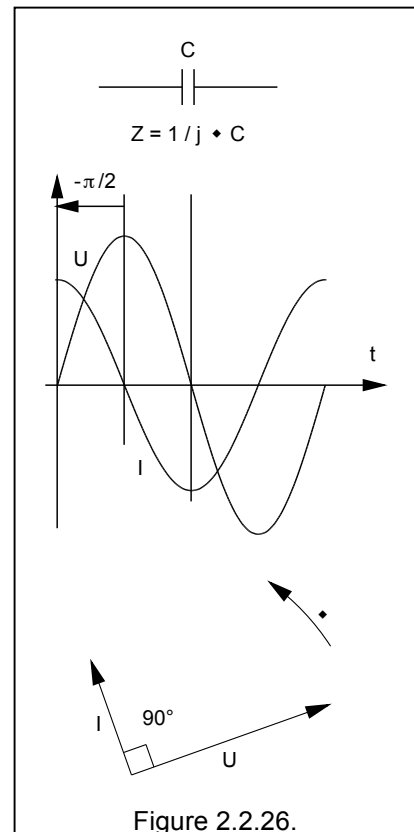
Lorsqu'un condensateur est utilisé en courant alternatif, on définit sa réactance comme le rapport entre la tension appliquée et le courant qui passe par le condensateur. La réactance d'un condensateur vaut

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

avec ω = pulsation = $2 \pi f$

Mais ce n'est pas tout, car il y a encore un déphasage entre le courant et la tension de $\pi/2$, on dit aussi que le courant est en avance de $\pi/2$ et, en anglais on emploie le terme 'lagging'.

Par convention l'angle de déphasage se mesure en prenant la tension comme référence.



2.3. Les bobines

2.3.1. Généralités

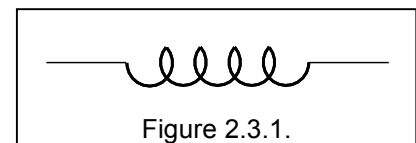
Les bobines sont des éléments qui sont principalement utilisés dans les circuits à courants alternatifs basse fréquence, audio fréquence ou en haute fréquence dans les émetteurs et dans les récepteurs.

Une bobine est constituée par un conducteur isolé ou non, enroulé sur un support muni ou non, d'un noyau magnétique et entouré ou non d'un blindage.

Une bobine est caractérisée par son inductance c'est-à-dire la propriété d'un circuit électrique d'engendrer une force électromotrice (f.é.m.) lorsqu'on la fait varier le courant qui la traverse.

L'inductance d'une bobine est en relation avec son nombre de spires, son diamètre, sa forme, sa longueur, mais la présence d'un noyau et la nature de ce noyau peuvent fortement influencer la valeur de l'inductance.

Le symbole général de la bobine est représenté ci-contre.



L'unité d'inductance est le **henry**, symbolisé par **H**. Une bobine d'inductance de un Henry est une bobine dans laquelle une variation de 1 ampère à la seconde produirait une force électromotrice de 1 volt.

Mais les inductances utilisées habituellement sont assez faibles et on utilise les sous multiples

- le **millihenry**, symbolisé par mH, $1 \text{ mH} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Henry}$,
- le **microhenry**, symbolisé par μH , $1 \mu\text{H} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Henry}$, et,
- le **nanoenry**, symbolisé par nH, $1 \text{ nH} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Henry}$.

2.3.2. Les facteurs qui déterminent l'inductance

L'inductance d'une bobine détermine certaines conditions du circuit. L'une de ces conditions est l'opposition au changement de courant. L'autre est la quantité d'énergie emmagasinée sous forme de champ magnétique. La f.é.m. induite dépend aussi de l'inductance. L'inductance d'une bobine dépend de quatre facteurs :

- le nombre de tours de la bobine,
- le diamètre de la bobine
- la longueur de la bobine
- et le type de noyau ou mieux dit de la perméabilité magnétique du noyau.

Calculer l'inductance d'une bobine n'est pas une chose aisée, il existe une série de formules (empiriques) qui ont chaque fois un domaine d'application limité :

Pour une bobine à une seule couche, la formule de Nagaoka, donne la valeur de la self :

$$L_{\mu H} = k n^2 d_{(cm)} 10^{-3}$$

dans cette formule

D est le diamètre moyen en cm

k est un coefficient qui dépend du rapport d/l de la bobine et vaut $k = (100 \times d) / (4 d + 11 l)$

Pour une bobine à plusieurs couches :

$$L_{(\mu H)} = \frac{(0,08 \times d_{(cm)}^2 \times n^2)}{(3 d_{(cm)} + 9 l_{(cm)} + 10 e_{(cm)})}$$

avec d est le diamètre moyen en cm

l est la largeur en cm

e est l'épaisseur de la bobine en cm

La formule de base qui régit les inductances est

$$L = \mu_0 \mu_r S n^2 / l$$

dans laquelle μ_0 est la perméabilité du vide ou de l'air ($\mu_0 = 1,25 \mu H/m$)

μ_r est la perméabilité relative

S est la section de la bobine

l est la longueur

n est le nombre de spires

Ce qu'il faut surtout retenir c'est que

la self varie en fonction du carré du nombre de spires

Donc

- si on double le nombre de spires, la valeur de l'inductance va être multipliée par 4,

- si on supprime la moitié des spires, la valeur de l'inductance va être divisée par 4, mais ce facteur de 4 x n'est qu'approximatif en effet en enlevant la moitié des spires ou en doublant le nombre de spires, on affecte aussi le facteur de forme de la bobine, c.-à-d. qu'on modifie la valeur diamètre/longueur.

La plupart des bobines sont réalisées sur des supports (ou mandrin), mais on peut aussi utiliser des "bobinages en l'air" c'est-à-dire sans support.

Comme les résistances, les bobines sont imparfaites : toute bobine présente en effet une résistance, celle de son fil.

Mais ce n'est pas tout : on sait aussi que deux morceaux de fils placés l'un à côté de l'autre présente une certaine capacité. Dans le cas d'une bobine les spires de celle-ci forment entre-elle des petites capacités. Toutes ces petites capacités parasites mises ensemble peuvent former une "certaine capacité" appelée de la capacité parasite de la bobine. Cette capacité parasite associée à l'inductance produit un circuit résonnant.

A la fréquence de résonance, l'impédance apparente de la bobine sera beaucoup plus grande que l'impédance théorique calculée (c.-à-d. plus grande que $Z_L = \omega L$) . Cette fréquence est appelée fréquence de résonance propre. Il faut toujours utiliser une bobine pour une fréquence de fonctionnement en dessous de sa fréquence de résonance propre.

Pour une fréquence supérieure à la fréquence de résonance propre, l'impédance apparente de la bobine sera beaucoup plus faible que l'impédance théorique calculée (c.-à-d. plus grande que $Z_L = \omega L$)

En d'autres termes la self devra être utilisée en dessous de sa fréquence de résonance propre.

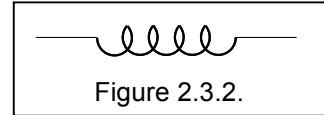
Pour des self très importantes, on peut remédier à ce phénomène en bobinant la self en plusieurs paquets et en écartant ces paquets les uns des autres.

Les bobines ont aussi un coefficient de température, et comme le cuivre se dilate, la surface de la bobine a tendance à augmenter, et la self aussi, le coefficient d'une bobine constituée par du fil de Cu est donc positif !

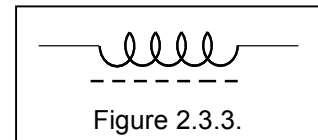
2.3.3. Influence du noyau

Afin de régler la valeur de l'inductance, les bobines sont généralement munies d'un noyau ferrite ou d'un noyau en aluminium. Mais l'utilisation d'un noyau permet aussi d'augmenter considérablement la valeur de l'inductance.

Le symbole ci-contre représente une bobine avec un noyau en feuille d'acier



tandis que le symbole ci-contre représente une bobine avec un noyau en poudre de fer ou en ferrite



2.3.3.1. Les noyaux en tôle de fer

Ces noyaux sont utilisés pour les transfo et pour les selfs en courant alternatif à basse fréquence (jusque 20 kHz environ).

2.3.3.2. Les noyaux à poudre de fer

Les noyaux en poudre de fer se caractérisent par une très bonne stabilité, ils conviennent pour les **circuits d'accords**. Le μ de la poudre de fer se situe entre 2 et 75.

La firme américaine Amidon (voir <https://www.amidoncorp.com/>) produit un large éventail de tores en poudre de fer.

Toute la série T-12 à T-520 utilise des poudres de fer. Le nombre indique le diamètre extérieur en 1/100^{ème} de pouce, un T-200 aura un diamètre extérieur de 2" soit env. 5,08 cm.

Dans le catalogue on trouve la liste des caractéristiques des matériaux suivants :

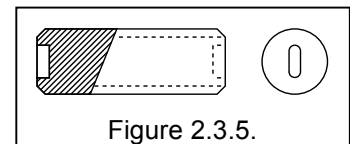
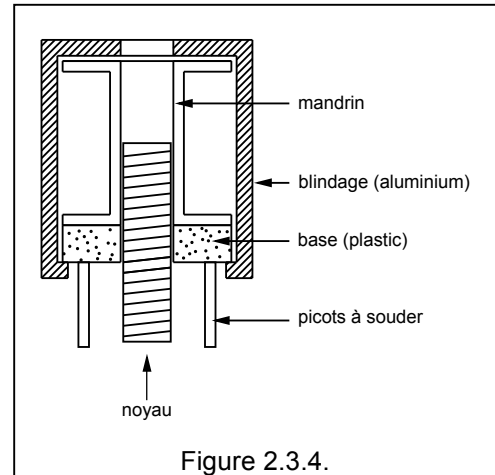
matériau	$\mu =$	couleur	gamme de fréquence	coeff t° (ppm/°C)
#0	1	Mg-Zn	> 200 MHz	
#1	20	Ni-Zn		280
#2	10	rouge	1 à 30 MHz	95
#3	35	gris	50 kHz à 500 kHz	370
#6	8	jaune	20 MHz à 50 MHz	35
#10	6	noir	40 MHz à 100 MHz	150
#12	3	vert-blanc	50 MHz à 100 MHz	170
#15	25	rouge-blanc		190
#17	3	vert-blanc		50
#26	75	jaune-blanc		822

En ce qui concerne les formes, on trouve :

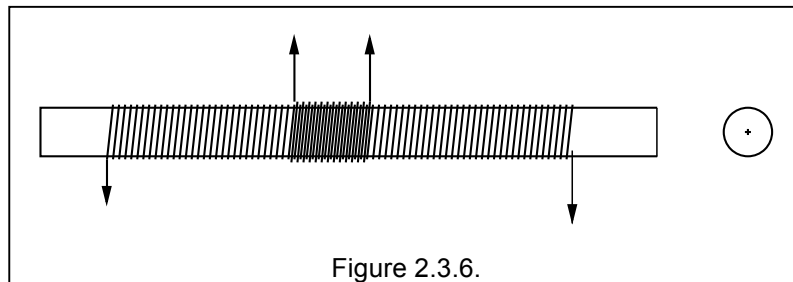
- des **noyaux** possédant un pas de vis et destiné à être mis dans les mandrins en plastics. Ces noyaux possèdent un "frein" constitué d'un tout petit morceau de feutre ou de mousse plastique et qui empêche le noyau de glisser une fois qu'on aura fait l'accord. Ces noyaux sont en outre munis d'une fente pour le réglage. Pour le réglage proprement dit on devra utiliser un tournevis amagnétique (= qui possède dont un μ_r égal à celui de l'air !) sinon le réglage sera faussé.

En réalité les noyaux sont utilisés dans un ensemble qui comporte un mandrin sur lequel on viendra bobiner le fil, et un blindage en aluminium. Les fils de la bobine sont connectés aux picots qui seront à leur tour soudés dans le circuit imprimé.

On peut se demander quelle est la plage de réglage disponible. Il est difficile de donner un chiffre exact, car l'influence du noyau dépend de sa nature (la nature du matériau ferrite), de la position dans le mandrin, de son volume, de la quantité de matière isolante présente entre le mandrin et la bobine, mais empiriquement on peut dire qu'un noyau ferrite permet d'obtenir par rapport à une fréquence moyenne une variation de fréquence d'accord de $\pm 15\%$. Evidemment en enfonçant le noyau (en le mettant plus au centre de la bobine...) la fréquence diminue.



- des **bâtons en poudre de fer** utilisés dans les antennes des récepteurs portatifs pour les OM et les OL



2.3.3.3. Les noyaux ferrites

Les ferrites sont des oxydes de la forme MFe_2O_4 dans lequel M représente un métal tel que le nickel, le manganèse le zinc ou le cuivre. Ils conviennent pour les **selfs de choc**, les **transfos**, etc ... mais pas pour les circuits d'accords. Les principales caractéristiques de ces ferrites sont

- le coefficient de perméabilité relative μ_r (c.-à-d. en prenant comme référence la perméabilité de l'air ou du vide) qui vont de 60 à 15000 environ, et,
- la plage de fréquence où ils sont utilisables, au-delà de cette fréquence les pertes deviennent importantes.

Les firmes Philips/MBLE/RTC proposent ainsi dans son catalogue les composants ferrites suivants :

matériau	$\mu =$	gamme de fréquence	utilisation
3D8	68	0,2 à 2 MHz	
3E1	2500		
3E2	> 5000		
3H1	220	1 à 700 kHz	
3H2	2300		
4C6	>100		

La firme américaine Amidon (voir <https://www.amidoncorp.com/>) produit un large éventail de matériaux ferrites. Dans le catalogue on trouve la liste des caractéristiques des matériaux suivants :

matériau	$\mu =$	composition	gamme de fréquences	coéff. t° (% entre 20 et 70°C)	utilisation
#33	850	Mg-Zn	1 kHz à 1 MHz		bâtonnet pour antenne
#43	850	Ni-Zn	30 MHz à 400 MHz	1	tore et perles ferrites
#61	125	Ni-Zn	0,2 à 200 MHz	0,15	tore, bâtonnet, baluns à 2 trous
#63	40		15 MHz à 25 MHz	0,1	tore
#64	250	Ni-Zn	jusque 4 MHz		perle
#67	40	Ni-Zn	10 MHz à 80 MHz	0,13	
#68	20		80 MHz à 180 MHz	0,06	tore
#72	2000		0,5 MHz à 50 MHz	0,6	tore
#73	2500		0,5 MHz à 50 MHz		perle
#75	5000		1 kHz à 1 MHz	0,9	transfo, tore et perle
#77	2000		0,5 MHz à 50 MHz	0,6	tore , pot, perle

Code Amidon :

FT xx yy	Ferrit Toroid = tore ferrite	xx = diamètre en centièmes de pouce yy = matériau
FB yy zz	Ferrit Bead = perle ferrite	yy = matériau zz = numéro de la forme
R yy dd ll	Rod = bâtonnet	yy = matériau dd = diamètre ll = longueur en centièmes de pouce

Parmi les formes des matériaux ferrites, on trouve principalement :

- des **perles de ferrites** à glisser sur un fil d'alimentation par exemple et qui constituera une self de choc pour un domaine de fréquence qui va de 30 MHz à 1 GHz. On peut aussi trouver des blocs en deux parties destinés à être mis au dessus de câbles existants et déjà équipés de connecteurs, on peut aussi trouver des blocs prévus pour être mis au dessus de câbles plats (câbles en nappe). Ces perles peuvent aussi être utilisées pour bobiner un transformateur HF ou VHF.

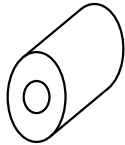


Figure 2.3.7.

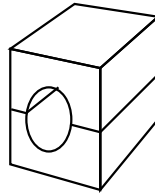


Figure 2.3.8.

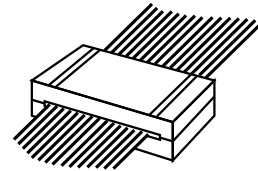


Figure 2.3.9.

- des noyaux à deux trous que l'on utilise principalement comme transformateur pour des fréquences allant de 100 kHz à quelques 300 MHz. Les 3 figures montrent le noyau, le bobinage et le schéma électrique qui y correspond. Cette forme de transfo présente moins de pertes que la simple perle ferrite décrite ci-dessus.

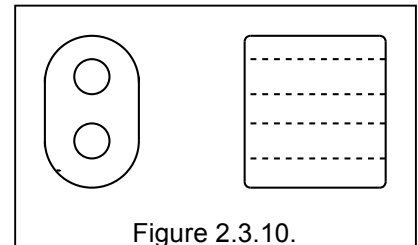


Figure 2.3.10.

- des noyaux à 6 trous utilisés comme self de choc (ce sont les fameuses "**VK200**" des schémas !). On peut faire 1,5 ou 2,5 tours. L'inductance est de l'ordre de 2 à 12 μH et ces selfs servent essentiellement de self de choc dans le domaine de 10 MHz à 1000 MHz.

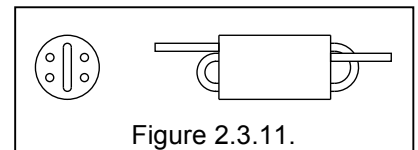


Figure 2.3.11.

- des **tores de ferrites** qui permettent de réaliser des inductances relativement importantes sous un petit volume ou de réaliser des transformateurs. Pour déterminer l'inductance d'un tore on utilise un coefficient A_L qui est exprimé en mH par 1000 tours ou en μH par 100 tours. Donc on applique les formules suivantes :

$$L_{(mH)} = n^2 \times A_L \times 10^{-6} \quad \text{si } A_L \text{ est en mH par 1000 tours}$$

ou

$$L_{(\mu H)} = n^2 \times A_L \times 10^{-4} \quad \text{si } A_L \text{ est en } \mu\text{H} \text{ par 100 tours}$$

où n représente bien sûr le nombre de spires. Mais il faut encore bien savoir compter le nombre de spires, sur la figure a ci-contre il y a 1 spire, et sur la figure b il y a 2 spires !!

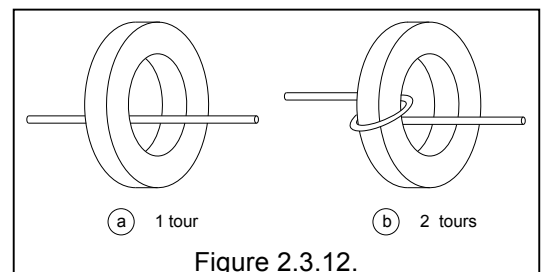


Figure 2.3.12.

Exemples:

- 1) On a un tore ferrite de la marque Amidon, ce tore est du type FT-50, et en matériau 43 (c'est un numéro donné par le fabricant !). Quelle est l'inductance si on fait une bobine de 10 tours ?
 Dans le catalogue Amidon, on trouve que $A_L = 523$ en mH par 1000 tours donc
 $L_{(mH)} = A_L n^2 \cdot 10^{-6} = 523 \times 100 / 1000000 = 0,0523 \text{ mH} = \text{en } 52,3 \mu\text{H}$

- 2) On a un tore Amidon du type T-50 et en matériau 6. Combien faut-il de tours pour obtenir une self de 500 μH ?
 Dans le catalogue on trouve $A_L = 40$ en μH par 100 tours.
 $n = 100 \sqrt{500/40} = 100 \sqrt{12,5} = 100 \times 3,5 = 350$ tours

- 3) On veut faire une bobine dont l'impédance soit plus grande que 50 Ω sur la bande des 160 m. On dispose d'un tore T-200 avec un matériau 6 dont $A_L = 100 \mu\text{H} / 100$ spires. Combien de spires faut-il bobiner ?
 $Z = \omega L \gg 50 \Omega$ d'où $L \gg 50 / \omega = 50 / 2 \pi 1,8 \cdot 10^6 = 4,4 \mu\text{H}$, prenons 10 x supérieur donc $L = 50 \mu\text{H}$. Par conséquent $n = 100 \sqrt{50/100} = 100 \sqrt{0,5} = 100 \times 0,7 = 71$ tours

Si on rassemble les spires d'un tore sur un secteur, la self augmente. Ainsi, pour un angle de 120°, la self peut être plus de 3 x plus importante que si elle était répartie uniformément. On comprend dès lors que si on "déforme" la position des spires dans un circuit accordé, on ne sera plus sur la même fréquence.

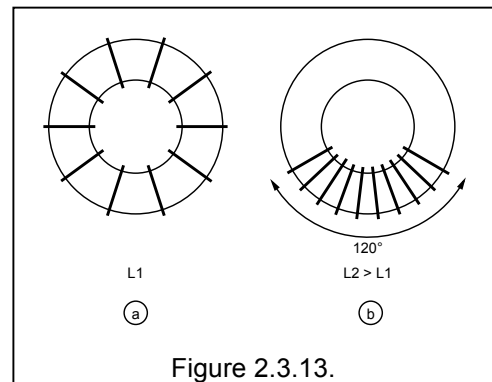


Figure 2.3.13.

- les **pots ferrites** permettent de réaliser des bobines de fortes inductances avec relativement peu de spires, avec une faible fuite. Les pots ferrites sont principalement utilisés pour les alimentations à découpage, les convertisseurs de tensions (DC-AC-DC), pour les transformateurs en audio fréquence (filtres et oscillateurs), pour les transformateurs en moyenne fréquence jusque 10 MHz environ . La figure ci-contre représente un pot en ferrite.

Une armature tient les deux parties ensemble. Nous n'avons pas représenté le mandrin en plastique qui supportera le bobinage, ni le noyau qui permet de faire varier (légèrement) le μ .

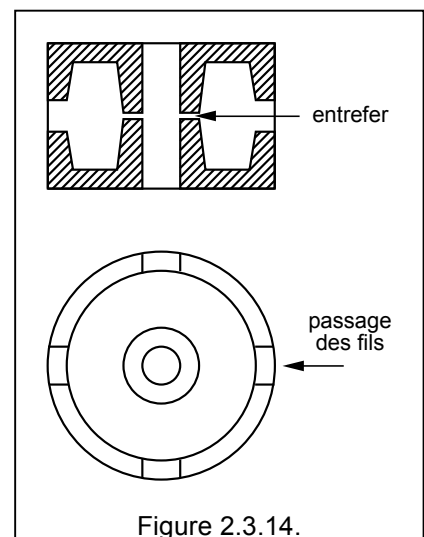


Figure 2.3.14.

2.3.3.4. Poudre de fer ou ferrite ?

Un petit résumé :

	Poudre de fer	Ferrite
marque Amidon : couleur exple de code	souvent gris FT , FB , R	souvent coloré T
marque Philips : couleur exple de code	coloré	
utilisation	circuit accordé (= précis) faible coefficient de t°	transfo, self de choc pas très précis

2.3.3.4. Les noyaux en aluminium et en laiton

Pour un noyau en aluminium, la variation est de l'ordre de $\pm 8 \%$, mais contrairement aux noyaux ferrites, si on enfonce le noyau la self diminue et par conséquent la fréquence augmente.

2.3.3.5. La saturation des noyaux

On se souviendra du cours d'électricité où on atteignait la saturation d'un noyau magnétique lorsque le bobinage était traversé par un courant important et du phénomène d'hystérésis. Il en est de même pour les bobines à noyau utilisées en électronique et en radioélectricité, toutefois lorsque les signaux manipulés sont faibles (circuits FI, oscillateurs, ...) on sera généralement bien en dessous du seuil de saturation. Mais il faudra tenir compte de ce phénomène pour les puissances élevées (étages de sortie, coupleurs d'antennes et baluns). La saturation du noyau se manifeste par un échauffement et donc aussi par des pertes.

2.3.4. Blindage et influence du blindage

Nous avons vu au paragraphe ? les blindages électrostatiques et électromagnétiques.

Revenons plus en détails sur le blindage dans le cas de deux bobines L_1 et L_2 (circuits accordés).

Lorsque deux bobines sont proches l'une de l'autre, les lignes de forces du flux produit par L_1 coupent L_2 , il y aura une tension induite.

Par ailleurs les bobinages présente une capacité de couplage.

Un simple écran formé d'une tôle mise à la masse constitue un écran et évite les couplages capacitifs (voir fig. b). Toutefois on voit maintenant apparaître 2 capacités (C_k) entre la bobine et la masse.

Blinder un bobinage contre l'induction magnétique est un problème plus délicat (voir fig. c), car si nous mettons autour de la bobine un capot, tout se passe comme si on mettait autour de la bobine une spire en court-circuit. Avec un blindage électromagnétique, on va donc ainsi augmenter les pertes dans le bobinage (Q va diminuer) et on diminue le coefficient de self induction. Pour réaliser un bon blindage magnétique sans affecter les qualités de la self, on doit donc réaliser un grand capot.

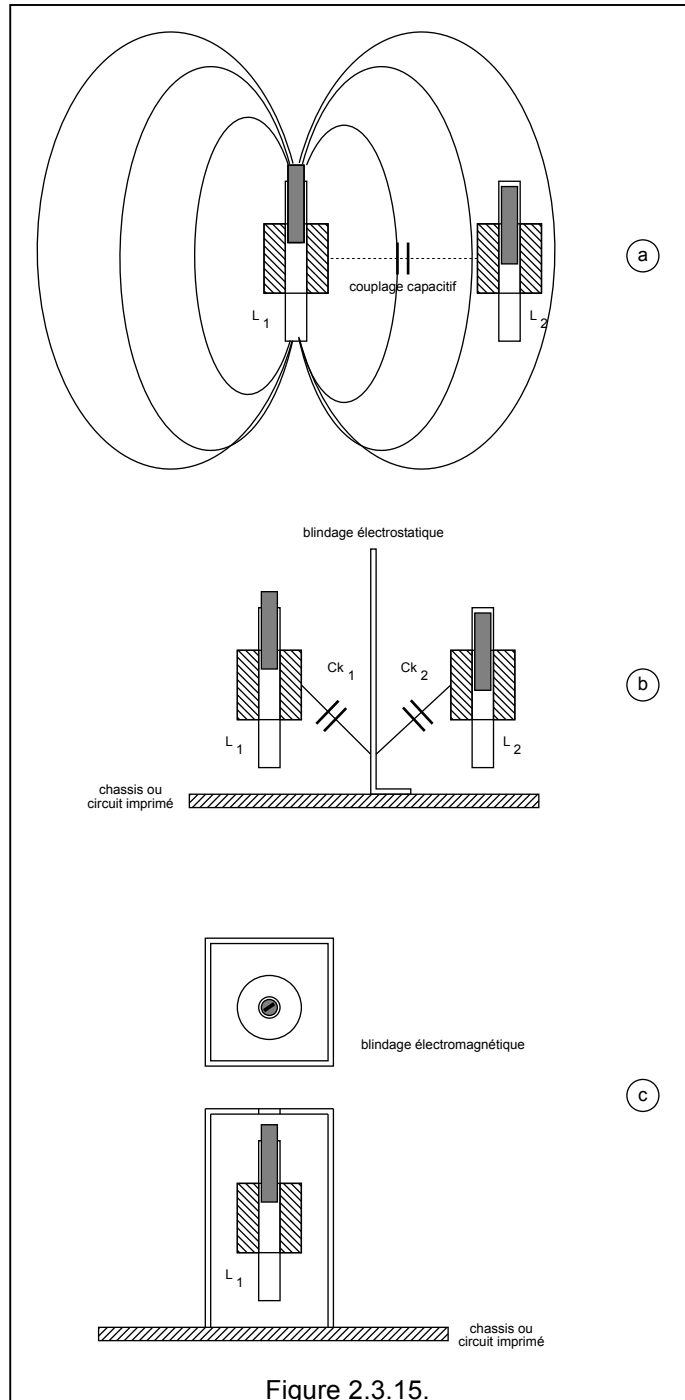


Figure 2.3.15.

2.3.5. Fils pour la réalisation de bobinage

On utilise du

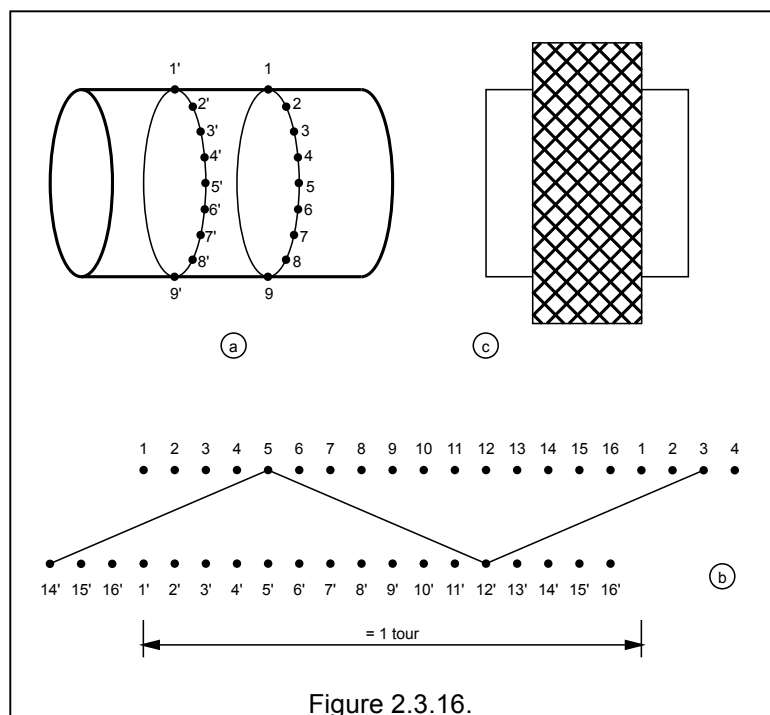
- fil de **cuivre nu argenté** : pour tous les bobinages à spires NON-jointives et pour des fréquences allant de 10 MHz à 1 GHz. Etant donné que l'argent est le meilleur conducteur et que seule la couche superficielle participe réellement à la conduction on recouvre les fils de Cu avec 5 à 20 microns d'argent.
- fil de **cuivre émaillé** pour les bobines à plusieurs couches dont le diamètre va de 0,02 à 2 mm. Le fil émaillé est utilisé pour les bobines de 100 kHz à 30 MHz.
- fil de **cuivre émaillé à verni soudable** : Les vernis soudables évitent de devoir dénuder le fil pour réaliser la connexion, cette opération constitue une perte de temps dans l'industrie et un risque de cassure à cause des outils tranchants qui laissent toujours un point de rupture sur le fil. Les vernis soudables fondent en fait à une température de l'ordre de 150°C. L'emploi de ce fil n'est pas recommandé pour les transformateurs où les températures peuvent être relativement élevées et où le risque de claquage est alors beaucoup plus important
- fil de **cuivre guipé** c.-à-d. du fil de cuivre entouré de soie
- **fil divisé** ou fil **Litz** qui se compose d'un certain nombre de fils de cuivre isolés les uns des autres et que l'on a entortillé.

Il existe plusieurs formes de bobinages, c'est-à-dire plusieurs façons d'enrouler le fil qui forme le bobinage :

- spires jointives ou espacées
- bobinages à une ou à plusieurs couches
- bobinages en **nid d'abeille** : essentiellement utilisées au début de la radio (1920-1935) les bobinages en nid d'abeille permettent de réduire les capacités parasites du bobinage.

Imaginons 16 points sur la circonférence du mandrin (fig. a), le fil passant par le point 5 ira de l'autre côté du bobinage sur le point 12', puis du 12' au 3, etc ... La bobine une fois terminée aura l'aspect de la fig. c. La fig. b représente le développement du bobinage.

Ce type de bobinage est encore utilisé pour les selfs de forte valeur et/ou lorsque les capacités parasites doivent être le plus petits possibles.



- bobinages en **fond de panier**¹⁰: essentiellement utilisées au début de la radio (1920-1935) les bobinages en fond de panier permettent (également) de réduire les capacités parasites du bobinage. Lorsqu'il s'agissait de faire des circuits d'accords pour les "GO" et les "OM" (100 kHz à 1600 kHz), les bobinages en fond de panier permettait aussi une meilleure reproductibilité. Une telle bobine avait un diamètre de 5 à 10 cm, elle comportait 100 à 200 tours de fils de 0,5 mm. Les selfs en fond de panier sont réalisées sur un disque de matériau isolant (du carton par exemple), muni d'encoches en nombre impair, le fil du bobinage passant d'une face sur l'autre à chaque encoche.

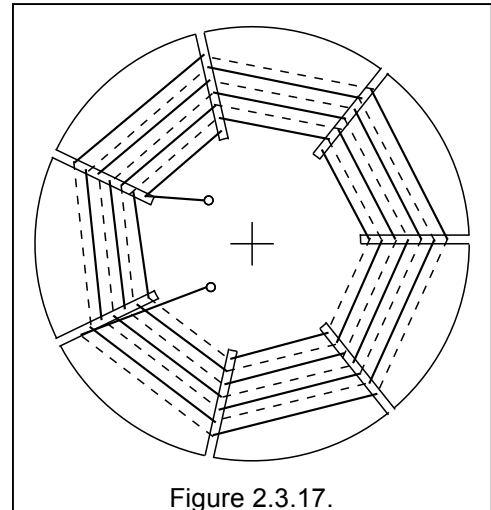


Figure 2.3.17.

2.3.6. Le facteur de qualité Q

Imaginons un circuit avec une self de 2,5 μH , une capacité de 50 pF.

Nous avons déjà parlé de cet effet de peau lorsque nous avons étudié les résistances. Revoir le paragraphe 1.6.

L'effet de peau va augmenter la résistance et par conséquent va faire diminuer le facteur de qualité Q de la self. Pour obtenir des circuits aussi sélectifs que possible et donc avoir des bobines avec des grands facteurs de qualités on peut par exemple utiliser du fil de cuivre argenté.

¹⁰ Pour mémoire !

2.3.7. Les types de bobinages

Nous allons maintenant recombinaer certaines notions vues ci-dessus !

2.3.7.1. Les bobinages en l'air

Ils sont principalement utilisés en VHF et en UHF, lorsqu'il y a peu de spires (1 à 10 spires) et lorsque le fil est assez rigide pour assurer une certaine solidité de la bobine.

A l'extrême, une bobine peut être constituée d'un morceau de fil droit. La figure ci-contre donne la valeur de la self par cm de longueur pour différents diamètres de fils et pour différentes hauteurs par rapport à un plan de masse.

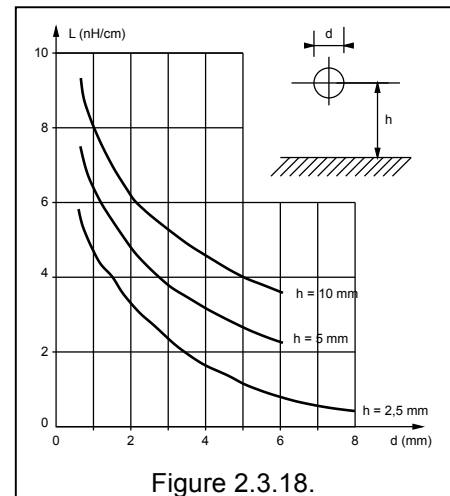


Figure 2.3.18.

2.3.7.2. Les bobinages sur mandrin, avec ou sans noyau, avec ou sans blindage

Ils sont utilisés dans les circuits amplificateurs accordés, ils comportent habituellement un noyau plongeur ajustable, ce qui permet de faire varier l'inductance dans un rapport de 3 environ.

Pour la gamme de fréquence de 100 kHz à 100 MHz, on utilise généralement des noyaux ferrites. Pour les circuits VHF et UHF, l'introduction d'un noyau magnétique peut augmenter les pertes, c'est pourquoi on préfère utiliser un noyau de cuivre ou d'aluminium.

Afin de réduire les influences extérieures (couplage et rayonnement) les bobines peuvent être équipées de blindages en cuivre ou en aluminium.

La figure ci-contre est "pour rappel".

Vu de la base, on trouve les 2 pattes à souder qui sont reliées directement au blindage et (en général) 5 picots, dont deux seulement sont utilisés lorsqu'il s'agit d'une self.

Le symbole est représenté à la figure d.

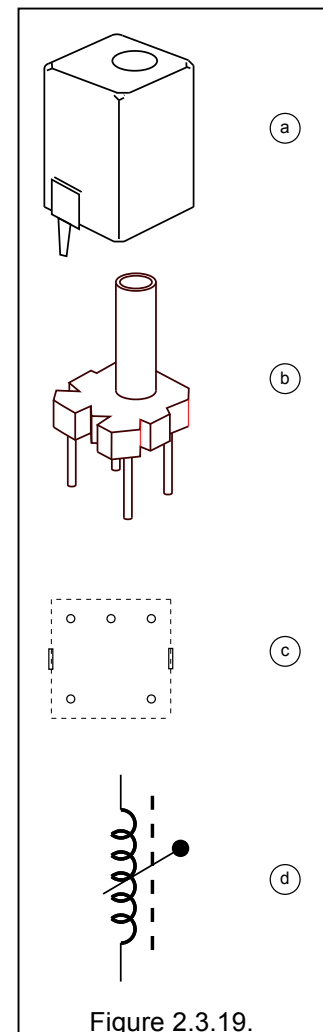


Figure 2.3.19.

2.3.7.3. Inductance d'un morceau de fil, microstrip et bobinages imprimés

Un morceau de fil placé à une certaine distance d'un plan de masse possède une certaine inductance mais pour les UHF-SHF cette inductance peut déjà être suffisante pour réaliser un circuit accordé.

Cette structure peut être réalisée en circuit imprimé, ce qui permet de réaliser des "microstrip" ou morceau de ligne, cette technique permet d'obtenir une reproduction aisée et précise dans les chaînes de fabrication. Pour les VHF, la ligne peut devenir trop longue, on "l'enroule" alors sur elle-même.

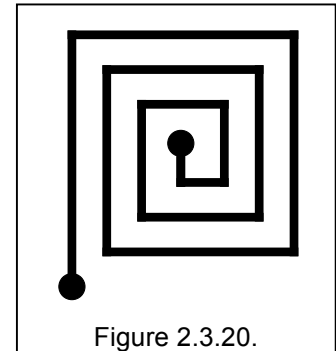


Figure 2.3.20.

2.3.7.4. Les bobinages avec noyau en oxydes magnétiques

Les bobinages avec noyau en oxydes magnétiques sont très utilisés pour les circuits à FI dans les récepteurs.

2.3.7.5. Les pots ferrites

Les pots ferrites sont essentiellement utilisés pour réaliser des bobines (ou des transfos) pour les basses fréquences et pour des fréquences atteignant quelques MHz au maximum.

2.3.7.6. Les selfs de choc ou "RF chokes"

Leur but est de constituer une résistance assez faible afin de laisser passer le courant continu, (pour assurer la polarisation d'un tube ou d'un transistor), mais de présenter une impédance assez forte pour le courant alternatif (c.-à-d. pour le signal utile).

Les selfs de chocs peuvent aussi se présenter sous la même forme qu'une résistance (figure a). Valeurs généralement disponibles : de 0,4 µH à 10 mH. Elles peuvent être marquées selon le code de couleur, et la valeur exprimée en µH.

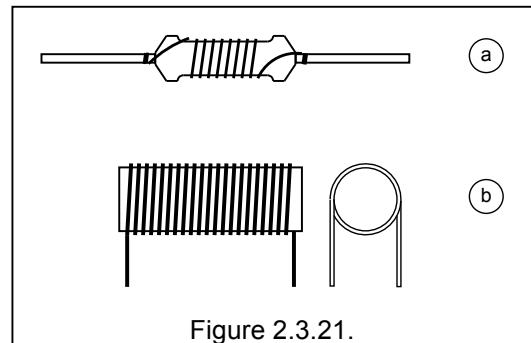


Figure 2.3.21.

En VHF et en UHF, les selfs sont généralement bobinées en l'air, 2 à 5 tours de fil de 0,3 mm bobiné en l'air avec un diamètre de 3 mm sont généralement suffisants.

Ci-contre une self de choke utilisée pour arrêter les flancs raides dans une alimentation à découpage. Le centre est un bâtonnet en ferrite. Ces selfs supportent de 1 à 10 A. Valeurs disponibles 0,5 à 10 µH.

2.3.7.7. Les selfs de filtrage

Les selfs de filtrage sont utilisées dans les alimentations afin de réduire la composante alternative et d'obtenir du courant continu à partir de courant unidirectionnel (pulsé). La self de filtrage s'emploie en combinaison avec un ou deux condensateurs de filtrage.

Afin d'éviter la saturation du noyau, il faut diminuer la reluctance, pour ce faire on utilise un noyau magnétique avec un entrefer de quelques dixièmes de mm.

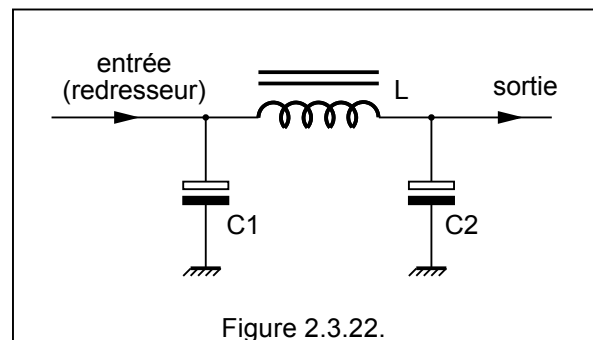


Figure 2.3.22.

En pratique, le type de tôles et les techniques de bobinages sont relativement similaires à celles utilisées pour les transfos 50 Hz (voir plus loin), à l'exception de l'entrefer que l'on réalise à l'aide d'un morceau de carton. L'entrefer doit être proportionnel à la section du fer. On peut utiliser la formule empirique

$$d_{(mm)} = 0,4 \sqrt{S_{Fe} (cm^2)}$$

Les tôles utilisées sont similaires à celles de transformateur 50 Hz (voir plus loin). L'aspect d'une self de filtrage est semblable à celui d'un transfo ... à part qu'il n'y a que deux connexions.

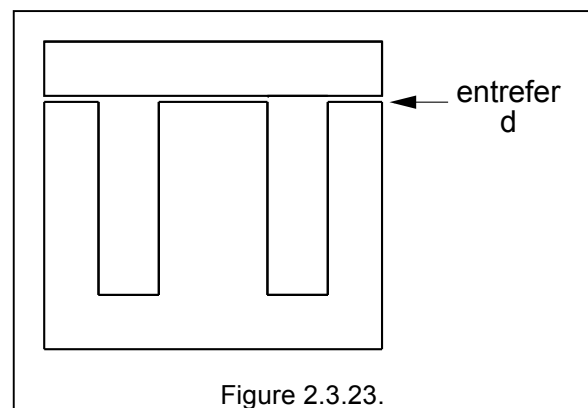


Figure 2.3.23.

La valeur de la self est déterminée par la relation

$$L = 1,3 \ n^2 \ S_{Fe} / 10^7 \ d$$

où N est le nombre de spires

S_{Fe} est la section du noyau en cm²

d est la largeur de l'entrefer en mm

Note¹¹.

¹¹ S'il n'y avait pas eu d'entrefer nous aurions eu $L = 1,3 \ \mu \ n^2 \ S_{Fe} / 10^7 \ l_e$ où l_e est la longueur du circuit magnétique.

2.3.8. La self en alternatif

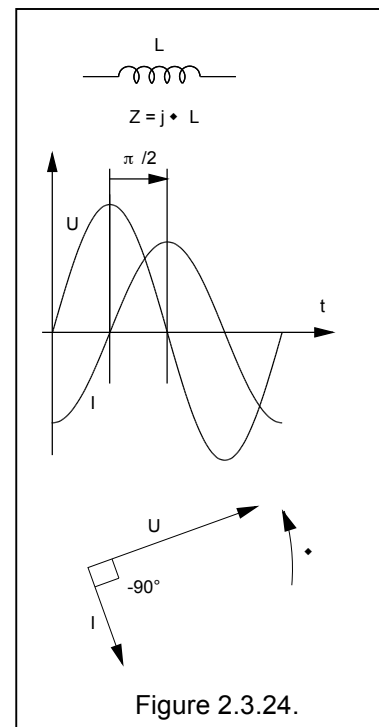
Lorsqu'une self est utilisée en courant alternatif, on définit sa réactance comme le rapport entre la tension appliquée et le courant qui passe par le condensateur. La réactance d'une self vaut

$$X_L = \omega L$$

avec ω = pulsation = $2 \pi f$

Mais ce n'est pas tout, car il y a encore un déphasage entre le courant et la tension de $-\pi/2$, on dit aussi que le courant est en retard de $\pi/2$ et, en anglais on emploie le terme 'leading',

Par convention l'angle de déphasage se mesure en prenant la tension comme référence.



2.4. Les transformateurs

2.4.1. Généralités

Si nous branchons une bobine sur une source de courant alternatif, il y aura un courant alternatif dans la bobine et un champ magnétique alternatif.

Si nous disposons une seconde bobine dans ce champ magnétique, une tension y sera induite. C'est le principe du **transformateur**¹².

Mais dans ce dispositif seul une petite partie du flux magnétique coupe la bobine du secondaire. On améliore alors le dispositif en plaçant les deux bobines sur un noyau magnétique.

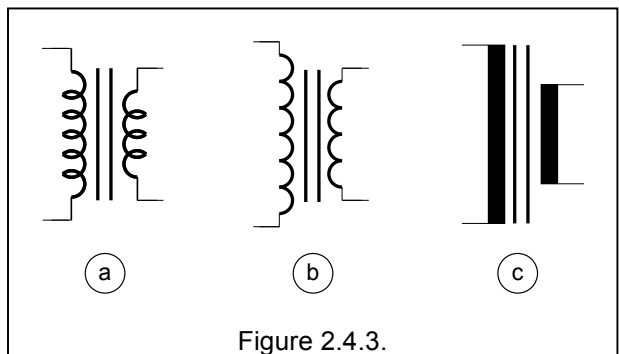
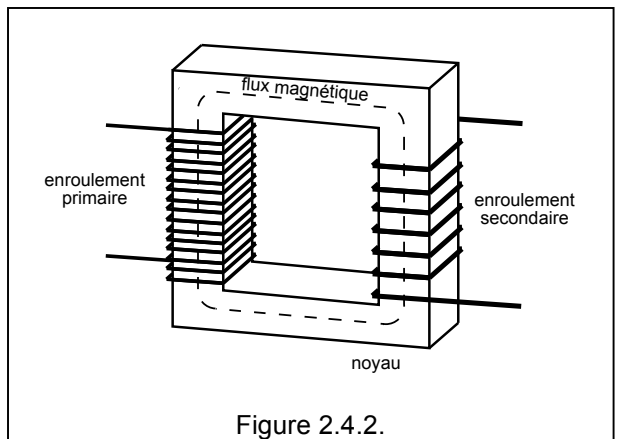
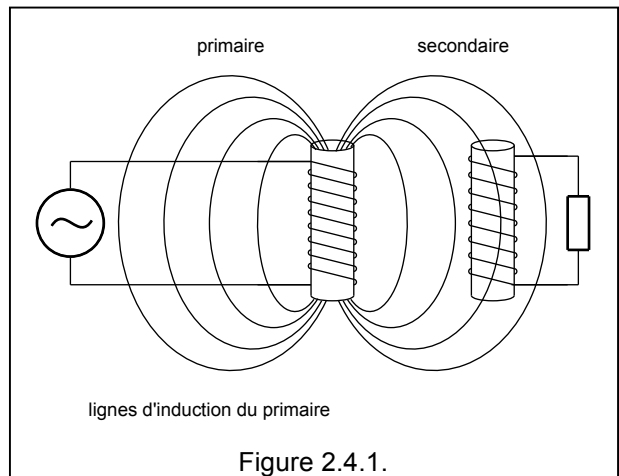
Lorsque deux bobines se trouvent ainsi l'une près de l'autre, on dit alors que les deux bobines sont couplées, et qu'il existe entre elles une **inductance mutuelle**.

Le rapport entre l'inductance mutuelle et l'inductance mutuelle maximale obtenue lorsque tout le flux magnétique traverse l'autre bobine est appelé **coefficient de couplage**.

Dans un transformateur on essaie que ce facteur de couplage soit le plus élevé possible, c.-à-d. qu'il soit voisin de 1. C'est pour cette raison que les deux bobinages sont sur un noyau magnétique. Ce noyau magnétique peut être constitué de tôles ou de matériaux magnétiques (voir les bobinages).

Tout transformateur possède donc au moins deux enroulements : un enroulement primaire et un enroulement secondaire (raccordé à l'utilisation). La figure ci-contre montre les 3 symboles utilisés pour les transformateurs.

Dans un transformateur, l'énergie peut être transférée d'un circuit vers un autre sans connexion galvanique, c.-à-d. sans contact.



On dit d'un transformateur est un transformateur parfait si toute la puissance du primaire se retrouve au secondaire, c'est-à-dire

transformateur parfait : $P_{\text{primaire}} = P_{\text{secondaire}}$

La puissance d'un transformateur est exprimée en **VA** c.-à-d en Volt-Ampère ou en multiples.

¹² On dit aussi "transfo".

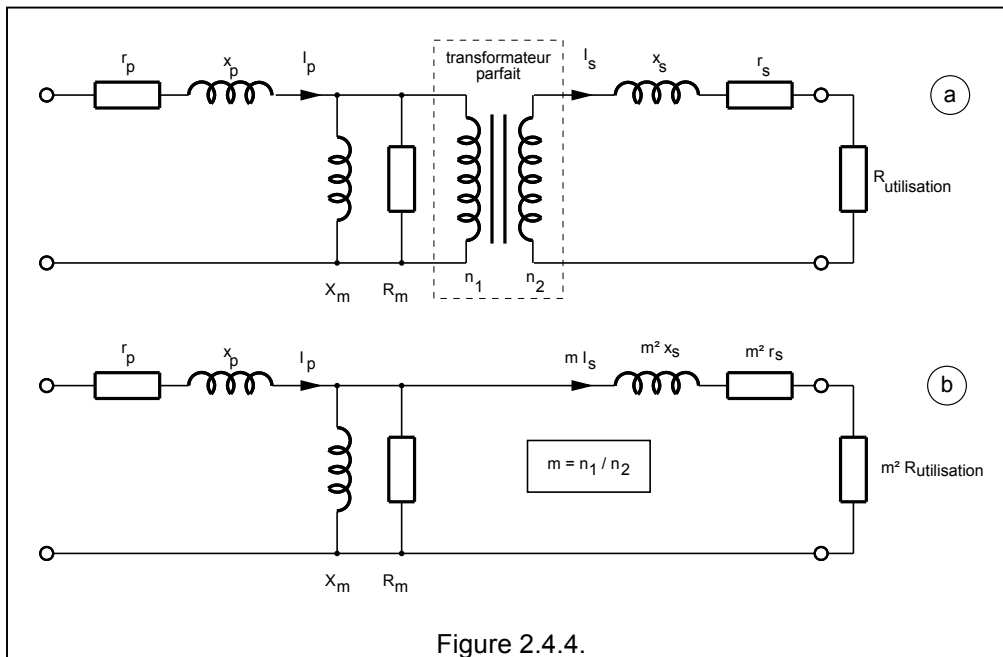
Il faut toutefois savoir qu'en réalité il n'en est pas exactement ainsi dans un transformateur réel :

- une partie de la puissance est perdue par l'effet Joule, en effet le courant I_p qui circule dans le bobinage primaire de résistance interne r_p produit une puissance thermique égale à $r_p I_p^2$. Il en est de même au secondaire où r_s produit une perte $r_s I_s^2$. Les pertes totales sont donc égales à $r_p I_p^2 + r_s I_s^2$ et sont appelées des "**pertes dans le cuivre**".
- une autre partie de la puissance est perdue par les courants de Foucault. Le champ magnétique coupe également le noyau et induit des courants dans les tôles du noyau. Ce courant produit aussi une certaine quantité de chaleur qui chauffe les tôles. C'est pour réduire ces pertes que le noyau est constitué de tôle. Ces pertes dépendent de la nature des tôles utilisées pour le noyau, ou de la nature du noyau ferrite. Ces pertes sont appelées les "**pertes dans le fer**". On peut représenter ces pertes comme une résistance R_m en parallèle sur le primaire.

Enfin pour trouver le schéma équivalent il faut aussi tenir compte de

- X_m représente l'inductance due au flux magnétique dans le noyau
- L_p et L_s représente les réactances de fuite réelles

Ainsi donc le schéma équivalent d'un transfo devient :



Le rendement d'un transformateur (P_{sec} / P_{prim}) traduit donc les effets de ces pertes.

- les tout petits transformateurs (< 10 VA) ont des rendements de l'ordre de 50 à 60 %.
- les transformateurs de 20 à 200 VA ont des rendements de 70 à 80 %
- les transformateurs de forte puissance (> 500 VA) ont des rendements de l'ordre de 90 à 95 %

Pour un transformateur réel on a donc

$$P_{primaire} = P_{secondaire} + \text{pertes}_{fer} + \text{pertes}_{cuivre}$$

Comment détermine t'on les pertes cuivre et les pertes fer ?

Pour mesurer les pertes cuivres, on court-circuite le secondaire et on alimente le primaire du transfo par une tension réduite de telle façon que le courant primaire soit égal au courant nominal. La puissance mesurée au primaire est alors égale aux pertes dans le cuivre.

Pour mesurer les pertes dans le fer, il suffit de laisser le secondaire du transfo ouvert et de mesurer la puissance au primaire.

2.4.2. Relations entre les tensions, les courants et les impédances

La formule de base qui régit les transformateurs

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

mais un transformateur permet aussi d'adapter l'impédance c.-à-d. que l'impédance vue du côté primaire du transformateur ou d'une façon encore plus générale.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

Exemples :

- 1) Un transformateur d'alimentation (50 Hz ou 60 Hz) possède 100 spires au primaire et 2000 spires au secondaire. Ce transformateur est alimenté par 120 V. Calculez la tension au secondaire ?

$$U_s = U_p (n_s / n_p) = 120 (2000/100) = 120 \times 20 = 2400 \text{ V}$$

Dans ce cas nous avons un transformateur élévateur (sous entendu de tension)

- 2) Un autre transformateur d'alimentation (50 Hz ou 60 Hz) possède 100 spires au primaire et 20 spires au secondaire. Ce transformateur est alimenté par 120 V. Calculez la tension au secondaire ?

$$U_s = U_p (n_s / n_p) = 120 (20/100) = 120 \times 0,2 = 24 \text{ V}$$

Dans ce cas nous avons un transformateur abaisseur (sous entendu de tension)

- 3) On a un transformateur 220 V / 24 V. Du côté secondaire (24 V), le courant est de 10 A. Quel est le courant au primaire ?

$$I_p = I_s (n_s / n_p) = 10 (220/24) = 91,66 \text{ A}$$

4) On a un transformateur 220 V / 3500 V. Du côté primaire (220V), le courant est de 25 A. Quel est le courant au secondaire ?

$$I_s = I_p (n_p / n_s) = 25 (220 / 3500) = 3,9 \text{ A}$$

5) On a un générateur qui fournit 100 V et sa résistance interne est de 10.000 Ω. On doit adapter ce générateur à une impédance de 400 Ω. Calculez le rapport de transformation et calculez la tension au secondaire.

$$n_p / n_s = \sqrt{Z_p / Z_s} = \sqrt{10000 / 400} = \sqrt{25} = 5$$

La tension au secondaire sera donc de 100 / 5 = 20 V

6) On a un transformateur audio dont l'impédance du primaire est de 2000 Ω et le rapport de transformation est de 24. Calculez l'impédance du secondaire.

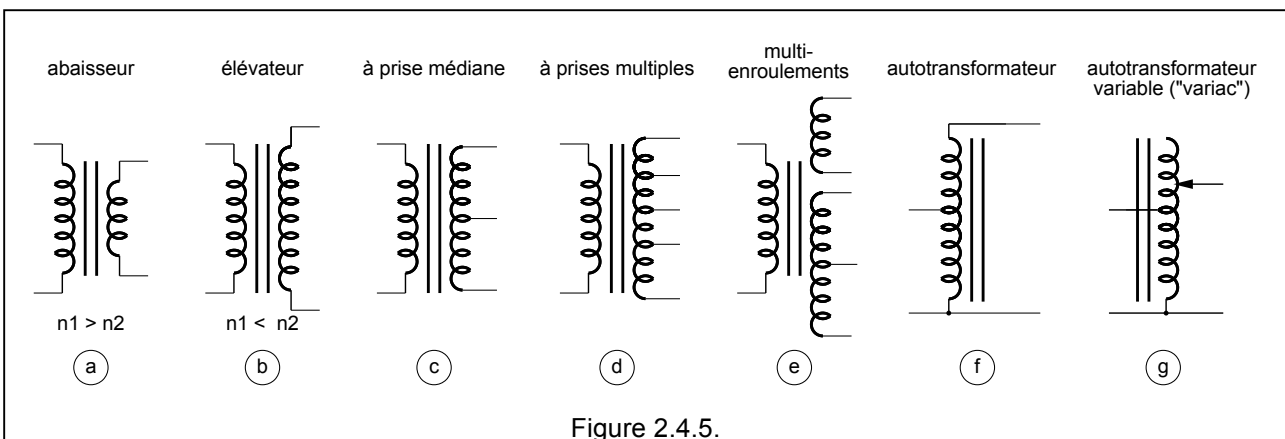
$$Z_s = Z_p (n_s / n_p)^2 = 2000 (1 / 24)^2 = 3,47 \text{ } \Omega . \text{ En pratique on pourra donc brancher un haut parleur de } 4 \text{ } \Omega , \text{ entre } 3,47 \text{ et } 4 \text{ il ne devrait pas y avoir une trop grande désadaptation.}$$

2.4.3. Les différents types de transformateurs

2.4.3.1. Classification d'après les enroulements

On peut distinguer :

- le transformateur abaisseur de tension où $n_2 < n_1$
- le transformateur élévateur de tension où $n_2 > n_1$
- le transformateur à prise médiane
- le transformateur à prises multiples
- le transformateur à enroulements multiples
- l'autotransformateur
- l'autotransformateur variable



2.4.3.2. Les transformateurs à la fréquence du secteur

Les transformateurs à la fréquence du secteur (50 Hz ou 60 Hz) ont des noyaux en minces tôles d'un alliage fer et de silicium (2 à 5% Si). L'épaisseur des tôles se situe entre 0,35 et 0,5 mm.

Pour les transfos (monophasés) de forte puissance (de 100 VA à 2 kVA), on utilise des tôles de forme "EI" (fig. a). En donnant un dimensionnement correct, on peut arriver à faire des tôles "sans déchets" (fig. b), le transfo a alors un format $6a \times 5a$. Les tôles EI sont empilées en quinconce de façon à ne pas avoir tous les entrefers d'un même côté (fig. c).

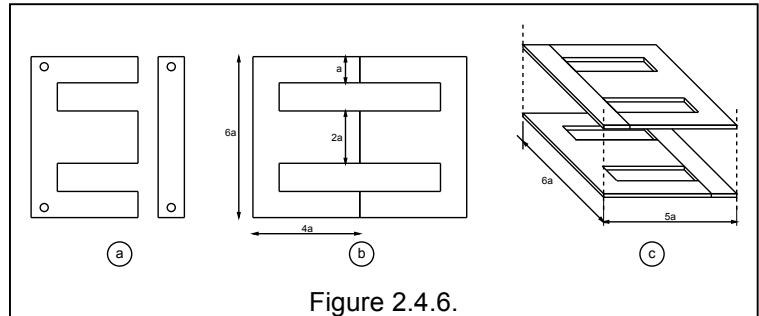


Figure 2.4.6.

Remarquons que la "colonne centrale" du transfo a une largeur $2a$, alors que les colonnes latérales n'ont d'une largeur de a .

En général on essaie d'avoir une hauteur de tôle empilée (h) voisine de la largeur de la colonne centrale ($2a$).

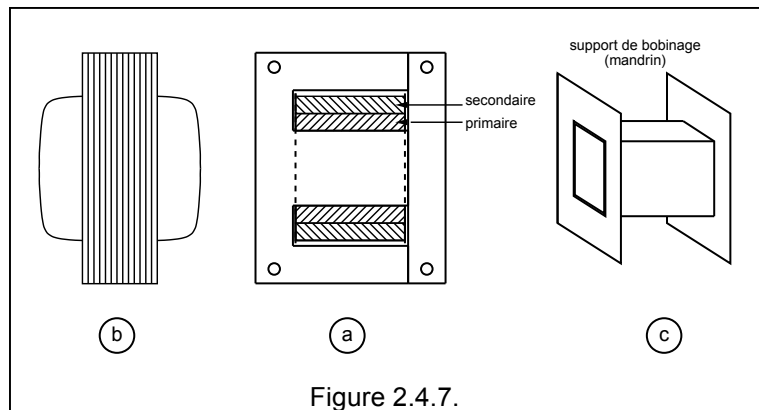


Figure 2.4.7.

En pratique, on utilise un mandrin en carton imprégné ou en plastic (fig. c) sur lequel on bobine le primaire, puis le secondaire et on intercale les tôles EI en quinconces.

Pour les transfos de faible puissance ($< 150 \text{ VA}$) on peut soit utiliser des tôles de formes EI comme expliqué plus haut. Mais notons que le rapport $6a / 5a$ ne doit pas nécessairement être respecté (tant pis pour le gaspillage!).

Mais pour les transfo de faible puissance on peut aussi utiliser des tôles de type "M" (fig. a) ou de type "MD". Lors de l'assemblage les tôles sont déformées de façon à venir remplir le mandrin.

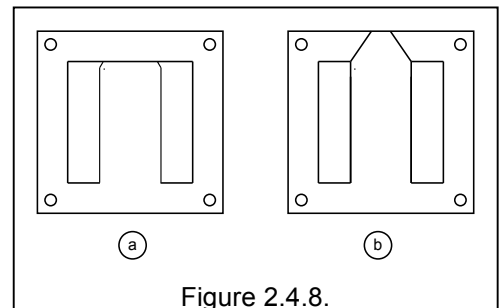


Figure 2.4.8.

L'entrefer peut être la source de fuites magnétiques, et le transformateur Philbert permet de réduire ces fuites en plaçant les entrefers à l'intérieur de bobinages et en évitant les arrêtes. Les tôles ont ici la forme de J.

Les tôles d'un transformateur sont maintenues

- soit par des tiges filetées
- ou, pour les petites puissances ($< 50 \text{ VA}$) par un cerclage en tôle emboutie comme indiqué à la figure ci-contre.

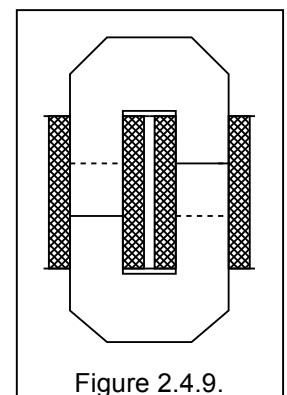


Figure 2.4.9.

Enfin le transfo torique possède un noyau constitué d'une mince lame de fer au Si (0,3 à 0,5 mm) enroulée sur elle-même (figure a). Ce noyau est garni d'un gabarit en carton et/ou d'une mince feuille de mylar (ou de plastic) pour éviter de blesser le bobinage et pour l'isoler.

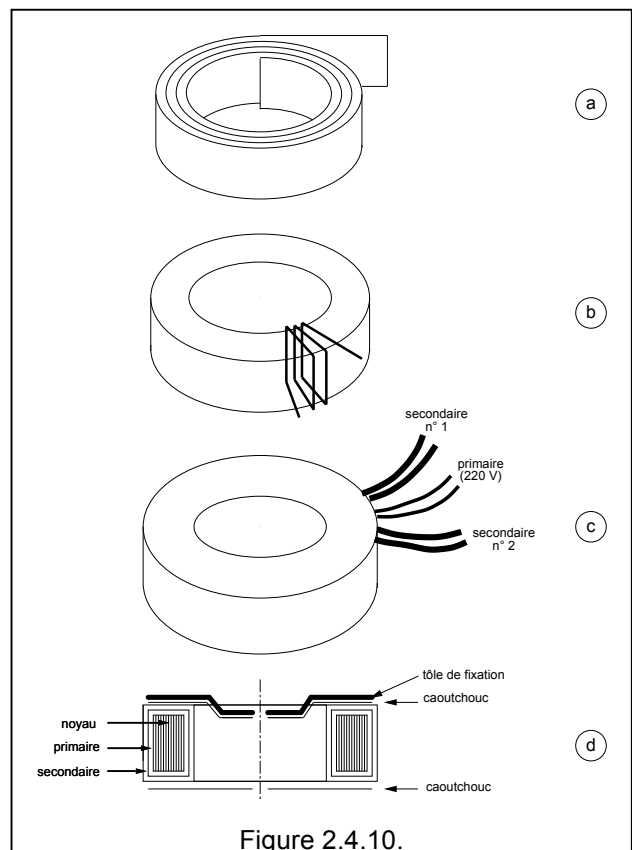
On bobine alors sur ce noyau le primaire et le secondaire (figure b).

Le transfo terminé prend l'apparence de la figure c.

La figure d montre la coupe. Une tôle préformée permet de fixer le transfo torique dans un boîtier. Notez également deux feuilles de caoutchouc pour éviter d'endommager le bobinage (figure d).

Les avantages du transformateur torique sont :

- gain de poids,
- dimensions plus réduites
- fixation par une seule vis
- un rendement électrique supérieur.



Finition des transformateurs

- pour les connexions on trouve des plaques à bornes pour les transfos de fortes puissances, des cosses à souder pour les transfos d'alimentation ou des picots pour les transfos enrobés.
- les transformateurs sont souvent imprégnés, c-à-d recouvert d'une laque ou d'un vernis.

La question concernant la fréquence du réseau

Un transfo conçu pour 60 Hz (appareils importés des Etats-Unis) aura un noyau magnétique un peu moins important que celui qui aura été conçu pour 50 Hz.

Si on applique du 50 Hz à un transformateur conçu pour 60 Hz et qu'on essaye d'en "tirer" la puissance nominale, ce transformateur va chauffer. A la longue ce transformateur peut même brûler. Au contraire si on applique du 60 Hz à un transformateur conçu pour 50 Hz, il n'y aura aucun problème et on pourra en "tirer" la puissance nominale.

Dans les avions, la fréquence est de 400 Hz, ce qui veut dire que dans ces transformateurs il y a encore moins de fer et que leur fonctionnement sur 50 ou 60 Hz est totalement incompatible.

La question de la tension nominale

Si on utilise un transfo sous une tension supérieure à celle prévue par le constructeur, le flux magnétique sera plus important, les pertes seront plus importantes, mais aussi le noyau sera plus fortement saturé. Une tolérance de + 10% est cependant tout à fait acceptable. Donc un transfo prévu pour 220 V peut parfaitement fonctionner sous 240 V. Bien sûr si on augmente la tension d'entrée de 10%, la tension au secondaire sera également plus élevée de 10 % ! $U_1 / U_2 = n_1 / n_2$ reste valable !

Il n'y a pas d'inconvénient à alimenter un transfo sous une tension plus faible que la tension nominale, mais on ne pourra évidemment pas obtenir la même puissance.

2.4.3.3. Les applications spéciales des transformateurs à la fréquence du secteur :

- **transformateur d'isolement** : Un transformateur d'isolement permet de résoudre les problèmes de d'isolation galvanique. Si par exemple il faut mettre un des conducteurs à la masse, il est préférable de passer par un transfo d'isolement. Les transfos d'isolement sont aussi utilisés dans les laboratoires, pour permettre de raccorder par exemple la masse de l'oscilloscope à la terre et pour ne pas avoir à le laisser à un potentiel flottant.

Les transfos d'isolement permettent aussi (parfois) d'adapter la tension (110, 130, 220, 240 ou 380 Volt) (fig. b).

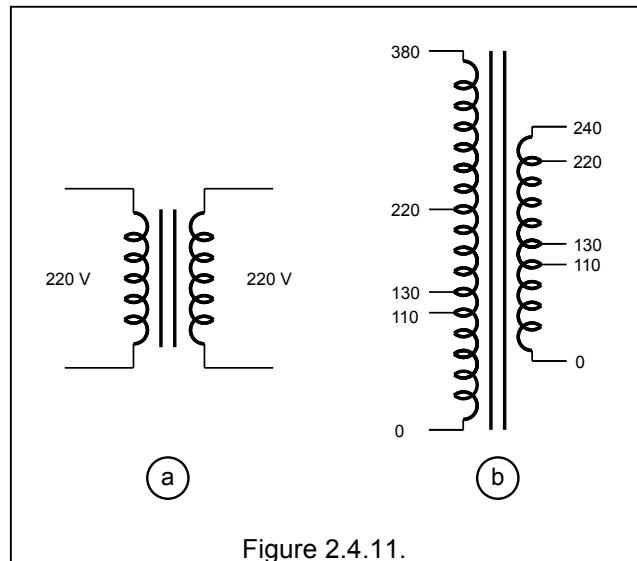


Figure 2.4.11.

- **autotransformateur** : Dans un autotransformateur le primaire et le secondaire du transformateur utilisent une partie du bobinage en commun. L'autotransformateur peut être élévateur de tension ou abaisseur de tension. Les propriétés de l'autotransformateur sont :

- le primaire et le secondaire ne sont pas isolés,
- à puissance égale un autotransformateur est plus petit qu'un transformateur. L'autotransfo sera plus léger et moins coûteux.

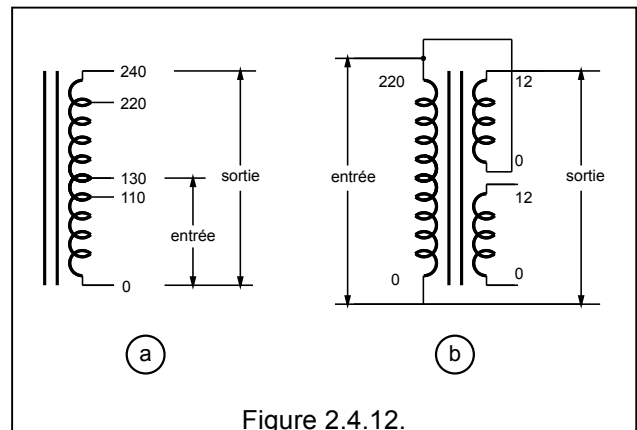


Figure 2.4.12.

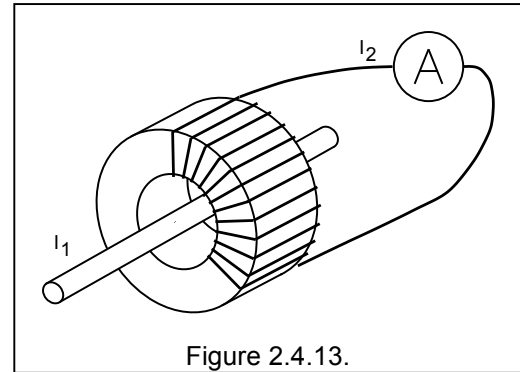
On utilise essentiellement des autotransformateurs:

- pour alimenter des appareils électriques qui étaient prévus pour une autre tension: par exemple pour alimenter des vieux appareils 110 V à partir du 220 V ou inversement.
- on peut aussi utiliser un autotransformateur en voyage pour alimenter des appareils électriques qui ne marchent qu'en 220 V sur un réseau à 110 V.
- pour rattraper la tension en bout de ligne. Supposons que l'on soit très loin de la cabine de transformation de la compagnie d'électricité et que la tension soit de 190 V au lieu de 220 V. Dans ce cas on peut utiliser un autotransfo pour "regagner" ces quelques 30 Volts. Le montage de la figure b montre comment utiliser un autotransfo "ordinaire" en auto transfo pour regagner 12 V à la sortie. En fonction de la phase relative des deux bobines on pourrait "gagner" ou "perdre" ces 12 V. En utilisant le 2eme enroulement secondaire, et en respectant les phases, on pourrait regagner 24 V.
- **autotransformateur variable** : il s'agit d'un autotransformateur qui possède un curseur. Le bobinage est réalisé sur un noyau cylindrique et le fil est dénudé pour former une piste sur laquelle glisse un curseur (un peu comme le curseur d'un potentiomètre). Ce type de transfo est parfois appelé **variatic**.

L'autotransformateur variable est utilisé dans les laboratoires pour faire des tests d'alimentations par exemple.

- **transformateur d'intensité (TI)** : Ce transfo est utilisé pour la mesure de courants alternatifs au-delà de 10 A. (voir aussi chapitre 8). Le primaire est constitué par le conducteur principal parcouru par une forte intensité. En général ce conducteur ne fait que passer au travers du transfo d'intensité (ce n'est donc qu'une spire). Le secondaire est branché sur un ampèremètre avec un calibre de 1 à 5 A.

Un transfo d'intensité, se caractérise donc par un rapport de courant on parlera d'un TI de 100 /1 A par exemple. Etant donné que le TI se place sur un conducteur existant, la forme la plus adaptée est le transfo toroïdal.



Le secondaire d'un TI ne doit jamais rester en circuit ouvert.

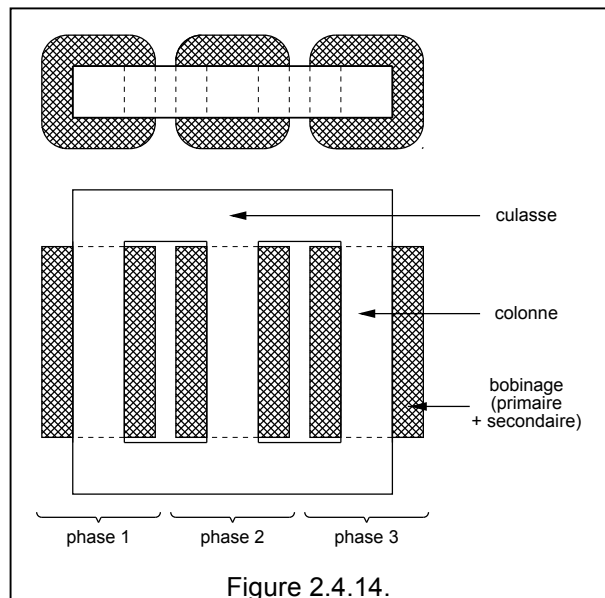
La pince ampère métrique n'est rien d'autre qu'un transfo d'intensité que l'on peut mettre autour d'un conducteur et ce de façon à ne pas devoir couper le conducteur.

- **transformateur triphasé¹³** : Les transfo triphasés comportent trois bobinages au primaire et 3 bobinages au secondaire.

Ces bobinages sont montés en étoile ou en triangle.

Les 3 colonnes du transfo ont la même section (à comparer avec le transfo monophasé à tôles EI).

Au-delà d'une certaine puissance, il est nécessaire de refroidir le transformateur soit par une circulation d'air forcée, soit par de l'huile. Mais ceci n'est plus de l'électronique c'est du "courant fort".

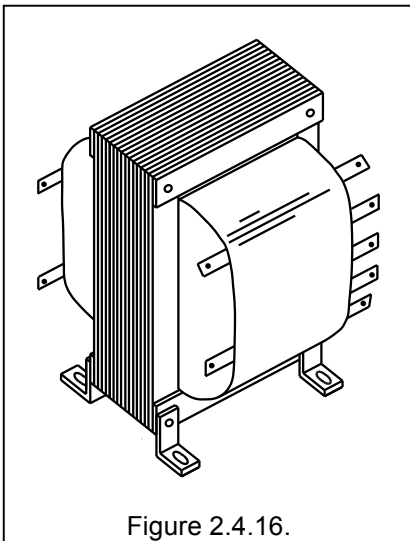
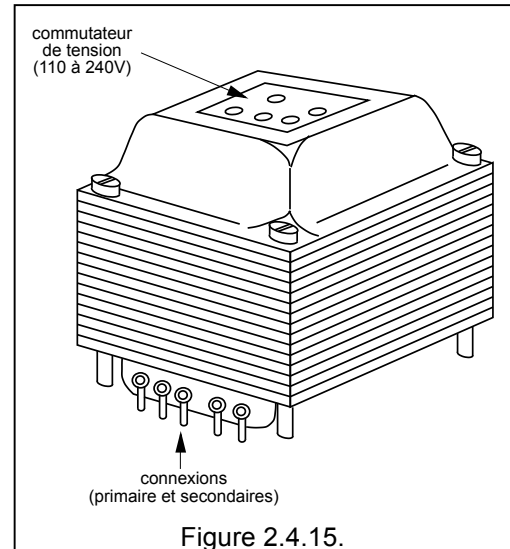


¹³ Il va de soi que les transformateur triphasés sont presque toujours utilisés pour des fortes puissances (> 1kVA).

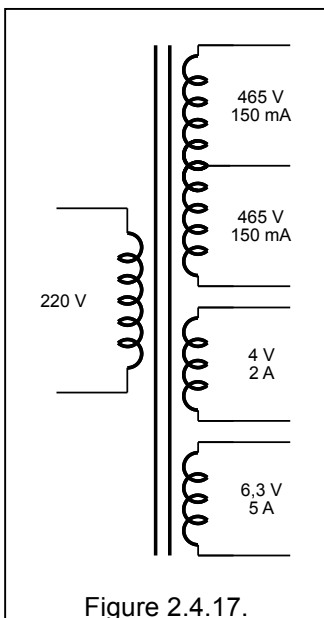
2.4.3.4. Les transformateurs d'alimentation

On appelle **transformateur d'alimentation**¹⁴ les transformateurs qui servent à adapter la tension du secteur aux montages électroniques. La tension du secteur (généralement 220V~) ne convient pas directement pour alimenter un montage, pour les équipements à tubes, elle est trop faible et pour les équipements à transistors, elle est trop élevée.

La figure ci-contre représente un transformateur semi-blindé avec un commutateur de tension pour la tension d'entrée (110 à 240 V). Les bornes sont situées en dessous.



La figure ci-contre (à gauche) représente un transformateur utilisé pour les petits montages à tubes (ampli, récepteurs, appareils de mesure, etc ..).



Typiquement pour un récepteur radio à tubes, un tel transfo comporte

- un enroulement à prise médiane pour la haute tension, avec une tension alternative de 2 x 250 à 2 x 500 V sous des courants de 100 à 200 mA
- un enroulement 4 V sous 2 A qui servira pour le chauffage du tube redresseur
- un enroulement 6,3 V sous 5 A qui servira pour les filaments des autres tubes

Pour les montages à tubes, le redresseur double alternance est le plus facile à réaliser. On utilise pour cela une double diode à cathode commune. La cathode étant alors à un potentiel très élevé, il faut un enroulement séparé pour le chauffage de ce tube.

Pour les amplificateurs de puissance (utilisés par les radioamateurs), la valeur de la haute tension, le courant à fournir et donc la puissance sont plus importants. La taille du transfo est donc également plus importante que celle d'un transfo pour un récepteur!

¹⁴ L'expression "transformateur d'alimentation" est peut être un pléonasme puisque tout transfo sert à alimenter quelque chose. Mais cette expression est utilisée par opposition aux transformateurs utilisés dans la distribution du courant industriels ou pour les autres applications électriques.

Une autre réalisation est représentée ci-contre. Ici les tôles ne sont pas maintenues par des tiges filetées, mais par une carcasse emboutie. Ce genre de transfo n'est utilisé que jusqu'à des puissances de l'ordre de 50 VA.

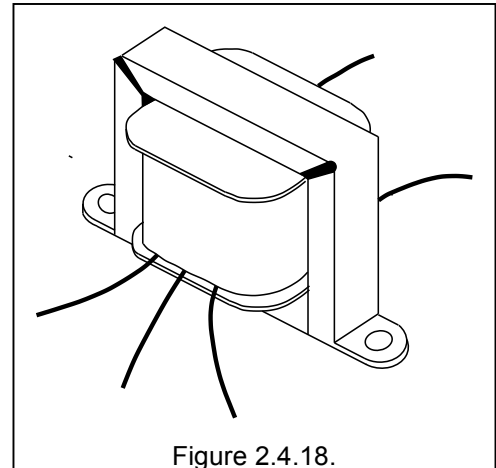


Figure 2.4.18.

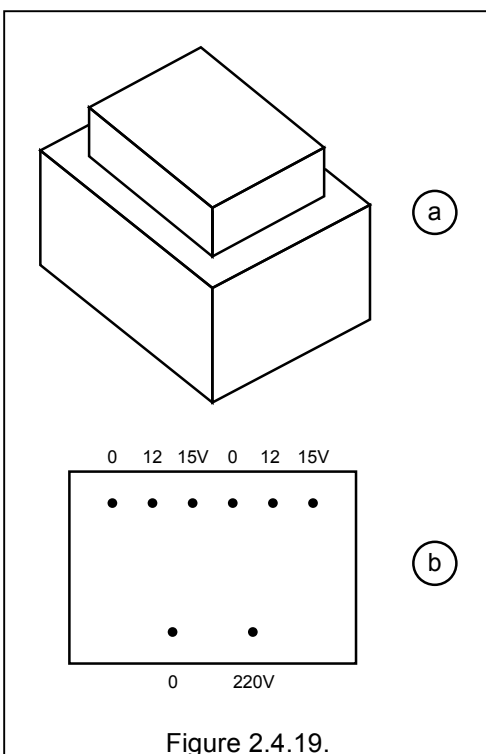


Figure 2.4.19.

Encore pour les faibles puissances (jusqu'à environ 50 VA) les transfos sont souvent moulés. Partant d'un transfo comme représenté ci-dessus, on l'enrobe simplement dans un bloc de résine. On ne distingue alors plus de tôles ni d'enroulements, il n'y a plus rien à voir ! (fig. a)

Seuls restent visibles les picots de connexions (fig. b).

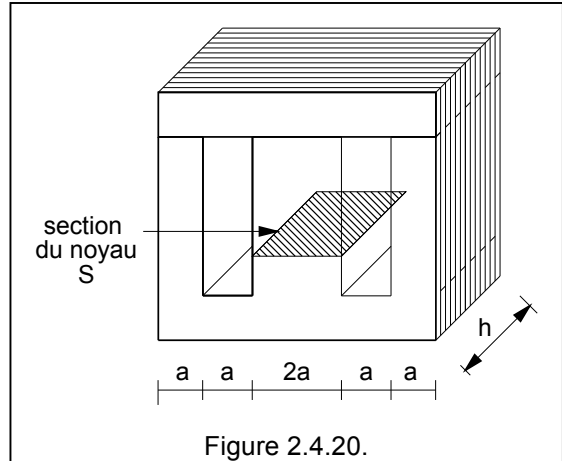
Pour l'alimentation des circuits à transistors, on a besoin de tension beaucoup plus faible. Ces transfos ont des puissances de 1 à 100 VA (environ) et les tensions au secondaire vont (typiquement) de 5 à 35 V.

Les transformateurs utilisés en électronique et dans le domaine des radioamateurs vont de quelques VA à quelques centaines de VA.

2.4.4. Méthode de calcul pour un transfo de petite ou moyenne puissance

- on calcule la puissance au secondaire ou on fait la somme des puissances au secondaire s'il y a plusieurs enroulements secondaire
- on tient éventuellement compte d'un facteur d'utilisation (voir plus loin dans le cas d'un émetteur CW/SSB)
- on détermine la puissance au primaire $P_p = P_s \eta$ où η est le rendement (75 à 95 %)
- on calcule la section du noyau ("section fer") :
$$S_{Fe} (cm^2) = 1,2 \dots 1,3 \sqrt{P_p (W)}$$
- on choisit (dans le catalogue d'un fournisseur) le type de tôle et les dimensions, en veillant que la hauteur h soit à peu près égal à $2a$. On corrige éventuellement la S_{Fe} en prenant cette fois la vraie section.
- on calcule le nombre de spires par Volt :
$$n = \sqrt{27} B_{max} S_{Fe} \omega$$

avec $B_{max} \approx 1,2$ à $1,6$ Wb/m²
- on calcule le nombre de spires pour chaque enroulement
- et pour le fil de bobinage on choisit généralement une densité de courant de l'ordre de 4 A/mm² pour les petits transfos (jusqu'à 50 VA) à 2 A/mm² pour les transfos à partir de 500 VA



2.4.5. Les transformateurs audio

Pour les fréquences audio, on utilise soit des transformateurs avec des noyaux de fer ou avec des noyaux en ferrites. La principale caractéristique est la bande passante à transmettre. Un transfo audio pour la Hi-Fi doit par exemple laisser passer de 20 Hz à 20000 Hz.

En audio on utilise essentiellement les transfos

- pour adapter l'impédance, par exemple l'impédance d'un amplificateur audio de puissance à l'impédance du haut parleur
- pour isoler galvaniquement un montage d'un autre, par exemple la sortie d'un récepteur avec l'entrée de la carte son d'un ordinateur

Le classique transfo 600 Ω / 600 Ω initialement destiné aux lignes téléphoniques permet une isolation galvanique. La puissance qu'il peut supporter est évidemment très faible (de l'ordre de 0,1 W).

2.4.6. Les transformateurs FI et HF

Les transformateurs sont également utilisés dans les étages moyenne fréquence des récepteurs, toutefois il s'agit de transformateurs accordés. Les fréquences typiquement utilisées sont 455 kHz pour les récepteurs OL/OM et 10,7 MHz pour les récepteurs FM. Dans les récepteurs OC (et plus spécialement ceux pour radioamateurs) on trouve encore d'autres valeurs standard de FI. Pour l'instant considérons uniquement le problème sous l'angle "transformateur".

La figure a ci-contre représente un tel transformateur pour un circuit à tubes. Les deux circuits sont généralement identiques.

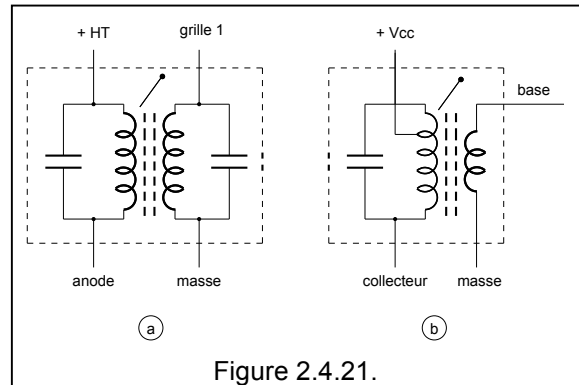


Figure 2.4.21.

La figure b représente un transformateur pour circuits à transistor. Les montages à transistors (et notamment le montage EC) ayant une impédance de sortie "moyenne", et afin d'avoir une bande passante relativement étroite (9 kHz en AM, 300 kHz en FM) on utilise une prise intermédiaire sur le bobinage. Ceci permet de ne pas trop amortir le circuit accordé.

On trouve donc généralement un mandrin avec un noyau en poudre de fer et avec deux bobinages.

Pour 455 kHz on retrouve typiquement deux bobinages en nid d'abeille (voir ci-contre), tandis que pour 10,7 MHz on n'a que quelques spires de fil émaillé.

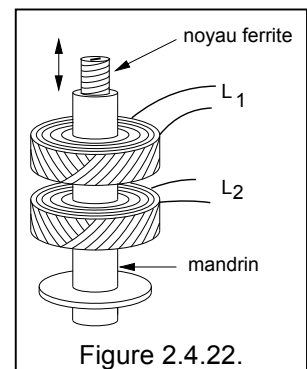


Figure 2.4.22.

Le tout est alors recouvert par un petit boîtier moulé en aluminium qui assure le blindage électrostatatique et le blindage électromagnétique. Une ouverture permet d'avoir accès au réglage du noyau.

Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre 4, lorsque nous verrons les récepteurs.

On utilise aussi des **transfos large bande**¹⁵. Ils sont généralement constitués d'un tore ou d'une ferrite à 2 trous :

Un autre exemple de transfo HF est le **balun**, ils sont généralement réalisés sur des tores en ferrites avec de bobinages bi ou tri filaires. Voir chapitre 6.

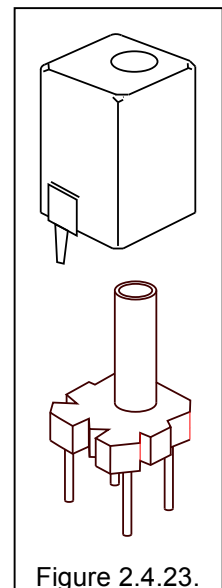


Figure 2.4.23.

¹⁵ Par opposition aux circuits accordés !

2.14. Le programme HAREC

Que faut-il connaître d'après le programme HAREC ?

CHAPITRE 2

2. COMPOSANTS

Vilnius
2004¹⁶

2.1 Résistance

- Résistance
- L'unité : l'Ohm
- Caractéristiques courant/tension
- Puissance dissipée
- Coefficient de température positive et négative [CTP et CTN] -

2.2 Condensateur

- Capacité
- L'unité : le farad
- La relation entre capacité, dimensions et diélectrique (aspect qualitatif uniquement)
- La réactance [$X_C = 1 / 2 \pi f C$]
- Déphasage entre la tension et le courant
- Caractéristiques, des condensateurs, condensateurs fixes et variables : à air, au mica, au plastique, à la céramique et condensateurs électrolytiques -
- Coefficient de température -
- Courant de fuite -
- Facteur de qualité Q +

2.3 Bobine

- Bobine d'induction
- L'unité : le henry
- L'effet du nombre de spires, du diamètre, de la longueur et de la composition du noyau (effet qualitatif uniquement)
- La réactance : [$X_C = 2 \pi f L$]
- Déphasage entre la tension et le courant
- Facteur Q
- L'effet de peau -
- Pertes dans les matériaux du noyau -

2.4 Application et utilisation des transformateurs

- Transformateur idéal : [$P_{\text{prim}} = P_{\text{sec}}$]
- La relation entre le rapport du nombre de spires et
- le rapport des tensions
- le rapport des courants:
- le rapport des impédances (aspect qualitatif uniquement)
- Les transformateurs

2.5 Diode

- Utilisation et application des diodes
- Diode de redressement, diode Zener, diode LED [diode émettrice de lumière], diode à tension variable et à capacité variable [VARICAP]
- Tension inverse, courant, puissance et température

2.6 Transistor

- Transistor PNP et NPN
- Facteur d'amplification
- Transistor effet champ [canal N et canal P J-FET]
- La résistance entre le courant drain et la tension porte -

¹⁶ Cette colonne indique la nouvelle matière ajoutée ou supprimée lors de la réunion CEPT de 2004.

- Le transistor dans :
- Le circuit émetteur commun [source pour FET]
- Le circuit base commune [source pour FET]
- Le circuit collecteur commun [drain pour FET]
- Les impédances d'entrée et de sortie des circuits précités
- Les méthodes de polarisation

-

2.7 Divers

- Dispositif thermoionique simple [valve]
- Circuits numériques simples
- Tensions et impédances dans les amplificateurs haute puissance à tubes, transformation d'impédance
- Circuit intégrés simples (y compris les amplificateurs opérationnels)

-

+

+

2.15a. Table des matières

2.1. Les résistances.....	3
2.1.1. Généralités.....	3
2.1.2. Les facteurs qui déterminent la résistance	5
2.1.3. Codes de marquage	8
2.1.3.1. Code des couleurs	8
2.1.3.2. Code à chiffres	10
2.1.4. Tolérance et valeurs normalisées	11
2.1.5. Types de résistances	13
2.1.5.1. Les résistances fixes	13
2.1.5.2. Les résistances réglables.....	16
2.1.5.3. Les résistances non linéaires	17
2.1.5.4. Les résistances spéciales	19
2.1.5.5. Résumé	21
2.2. Les condensateurs	23
2.2.1. Généralités.....	23
2.2.2. Les facteurs qui déterminent la capacité	24
2.2.3. L'énergie d'un condensateur.....	25
2.2.4. Le courant de fuite et les pertes.....	25
2.2.5. Fonction des condensateurs	26
2.2.6. Valeurs normalisées	26
2.2.7. Types de condensateurs.....	27
2.2.7.1. Les condensateurs à air	27
2.2.7.2. Les condensateurs au mica	27
2.2.7.3. Les condensateurs céramique	28
2.2.7.4. Les condensateurs au papier	29
2.2.7.5. Les condensateurs à film plastique métallisé.....	30
2.2.7.6. Les condensateurs électrolytiques	31
2.2.7.7. Les condensateurs au tantale	33
2.2.7.8. Les condensateurs variables.....	34
2.2.7.9. Les condensateurs ajustables.....	35
2.2.7.10. Les condensateurs de passages.....	36
2.2.7.11. Les condensateurs CMS	36
2.2.7.12. Résumé	37
2.2.8. Le condensateur en alternatif	38
2.3. Les bobines	39
2.3.1. Généralités.....	39
2.3.2. Les facteurs qui déterminent l'inductance.....	40
2.3.3. Influence du noyau.....	42
2.3.3.1. Les noyaux en tôle de fer	42
2.3.3.2. Les noyaux à poudre de fer.....	42
2.3.3.3. Les noyaux ferrites	44
2.3.3.4. Poudre de fer ou ferrite ?	47
2.3.3.4. Les noyaux en aluminium et en laiton	47
2.3.3.5. La saturation des noyaux	47
2.3.4. Blindage et influence du blindage	48
2.3.5. Fils pour la réalisation de bobinage	49
2.3.6. Le facteur de qualité Q.....	50
2.3.7. Les types de bobinages	51
2.3.7.1. Les bobinages en l'air	51
2.3.7.2. Les bobinages sur mandrin, avec ou sans noyau, avec ou sans blindage	51
2.3.7.3. Inductance d'un morceau de fil, microstrip et bobinages imprimés.....	52
2.3.7.4. Les bobinages avec noyau en oxydes magnétiques.....	52
2.3.7.5. Les pots ferrites.....	52
2.3.7.6. Les selfs de choc ou "RF chokes".....	53
2.4. Les transformateurs.....	55
2.4.1. Généralités.....	55
2.4.2. Relations entre les tensions, les courants et les impédances	57

2.4.3. Les différents types de transformateurs.....	58
2.4.3.1. Classification d'après les enroulements	58
2.4.3.2. Les transformateurs à la fréquence du secteur.....	59
2.4.3.3. Les applications spéciales des transformateurs à la fréquence du secteur :	61
2.4.3.4. Les transformateurs d'alimentation	63
2.4.4. Méthode de calcul pour un transfo de petite ou moyenne puissance.....	65
2.4.5. Les transformateurs audio	66
2.4.6. Les transformateurs FI et HF	67
2.14. Le programme HAREC.....	68
2.15a. Table des matières	70